

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

# **Topologická optimalizace a návrh bionické konstrukce dronu**

Topology Optimization and Bionic Design of Drone

Student:

Bc. Jan Velčovský

Osobní číslo

VEL0089

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marek Pagáč, Ph.D

Ostrava 2020

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Velčovský**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: **Topologická optimalizace a návrh bionické konstrukce dronu**  
**Topology Optimization and Bionic Design of Drone**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Současný stav.
3. Návrh a optimalizace bionické konstrukce dronu.
4. Technické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

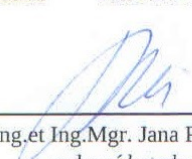
DOBBS, Sarah et al. SB LTD. *The Ultimate Guide To 3D Printing*. London: Dennis Publishing Ltd, 2014, 48 s. ISBN 1-78106-309-5.  
GIBSON, I., D. W ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010. ISBN 1441911200.  
BATEMAN, Rob a Richard OLSSON. *The essential guide to 3D in Flash*. Berkeley. California: Friends of Ed, [2010]. ISBN 978-1-4302-2542-6.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Kučerka', is written above a horizontal dashed line.

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ведомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské\*) práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ведомі, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská\*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.



---

Podpis studenta

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VELČOVSKÝ, J. Topologická optimalizace a návrh bionické konstrukce dronu: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a s strojírenské metrologie, 2020, 59 s. Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč, Ph.D

Diplomová práce se zabývá topologickou optimalizací bionické konstrukce dronu. V teoretické části je krátce zmíněna historie a vznik dronů. Následovně jsou uvedeny a rozebrány typy všech dronů které si může člověk buďto koupit nebo sestrojít. Dále je vymezeno, co přesně je topologická optimalizace a jsou zde zmíněny i další její druhy, jako je optimalizace tvaru a dimenzování. Dále je rozebrána problematika bioniky, a kde všude se s ní můžeme potkat a jakým způsobem zasahuje do strojního inženýrství. V praktické části je zpracován celý průběh optimalizace rámu, který se prováděl v programu Altair Inspire. Tento proces je doprovázen řadou výpočtů, které vedou k výsledné konstrukci rámu, jež je ve výsledku lehčí než samotný návrh hmotnosti. Na konci této práce je shrnuta stavba samotného dronu, jak postupně vznikala v jeden celek. Závěr práce obsahuje technické vyhodnocení.

## THESIS ANNOTATION

VELCOVSKY, J. Topology Optimization and Bionic Design of Drone: Master Thesis: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining Assembly and Engineering Metrology, 2020, 59 s. Thesis head: Ing. Marek Pagac, Ph.D

This thesis discusses topological optimisation of bionic drone construction. The theoretical part summarises the history of drones and their emergence, and describes various drone types that can be bought and built. Following from there, the thesis then defines topological optimisation and identifies ways of optimisation such as shape optimisation and dimensioning. Lastly, the theoretical part discusses the challenges of bionics and states how such challenges may emerge and how it may impact mechanical engineering. In the practical part, the thesis takes the reader through the whole process of frame optimisation, which has been done in Altair Inspire software. The process description is supplemented with multiple calculations which were necessary for the final construction of the drone's frame, which is actually lighter than what has been originally expected. Towards the end, this thesis shows the construction of the drone, from its beginnings to the final product, and technical evaluation is provided at the very end of this thesis.

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce za nové a cenné informace o celé stavbě dronu, za trpělivost a vedení jak osobní, tak i online, aby bylo dosaženo stanoveného cíle. Dále děkuji Ing. Lukáši Jančarovi za celé vedení této diplomové práce a za dobré tipy a rady o 3D tisku.

Diplomová práce byla vypracována za podpory projektu: „Specifický výzkum inovativních technologií výroby“, reg. č. „SP2020/27“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

# Obsah

Seznam použitých značek a symbolů .....	8
1. Úvod .....	10
2. Současný stav .....	11
2.1. Vývoj a rozdělení základních dronů .....	11
2.2. Typy dronů .....	12
2.3. Rozdělení dronů podle konstrukce .....	12
2.3.1. Trikopty .....	12
2.3.2. Kvadropty .....	12
2.3.3. Hexakpty .....	14
2.3.4. Oktakpty .....	14
2.4. Rozdělení podle druhu rámu a jejich velikosti .....	15
2.5. Princip letu dronu.....	16
2.5.1. Vzletání .....	17
2.5.2. Vznášení.....	17
2.5.3. Klonění .....	17
2.5.4. Klopení .....	17
2.5.5. Otáčení.....	17
2.6. Legislativa a rizika.....	18
2.6.1. Předpisy v ČR.....	18
2.6.2. Rozdělení do kategorií.....	18
2.6.3. Povolené vzdálenosti .....	19
2.6.4. Ochrana soukromí.....	19
3. Postup konstrukční optimalizace .....	21
3.1. Topologická optimalizace.....	22
3.1.1. Předběžné zpracování geometrie a zatížení .....	22
3.1.2. Samotný průběh topologické optimalizace .....	22
3.2. Optimalizace tvaru .....	23
3.3. Dimenzování.....	23
3.4. Srovnání všech metod.....	24
3.5. Následné zpracování výsledků .....	25
3.5.1. Metoda SIMP.....	25
3.6. Bionické konstrukce .....	26
3.6.1. Bionické konstrukční metody.....	27
3.6.1.1. Konstrukční metoda sloupů.....	27

3.6.1.2.	Struktura stylu kůry.....	27
3.6.1.3.	Pružné prutové systémy .....	28
3.6.1.4.	Geodetické konstrukce .....	29
3.7.	Funkce přírody a struktury .....	29
3.8.	Příroda a strukturální estetika .....	30
4.	Konstrukční návrh dronu .....	32
4.1.	Komponenty pro stavbu dronu .....	32
4.1.1.	Motor .....	32
4.1.2.	ESC regulátor.....	33
4.1.3.	Vrtule .....	34
4.1.4.	Akumulátor .....	35
4.1.5.	Řídící jednotka .....	38
4.1.6.	Přijímač .....	39
4.1.7.	Ovladač .....	40
4.1.8.	Doplňující komponenty.....	41
4.1.9.	Rám .....	41
4.2.	Stanovení zátěžových stavů a návrh samotné konstrukce .....	42
4.3.	Průběh optimalizace .....	47
4.4.	Výsledky analýzy konečných prvků .....	51
4.5	Průběh tisku a stavby dronu .....	52
4.5.1	Upevnění motorů a následné připojení ESC regulátorů a baterie.....	53
4.5.2.	Konfigurace firmware Betaflight.....	54
4.5.3.	Konstrukce se součástkami.....	54
5.	Technické zhodnocení .....	55
6.	Závěr .....	57
7.	Zdroje .....	58



## Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Popis	Jednotka
$A_l$	prodloužení po přetrhnutí	[%]
$C$	vybíjecí proud	[-]
$F_1, F_2, F_3, F_4$	síla	[N]
$F_i$	složka vzestupného tahu	[g]
$F_{tc}$	celkový vzestup	[g]
$F_y$	složka síly ve směru y	[N]
$F_z$	složka síly ve směru z	[N]
$I$	proud	[A]
$I_D$	nabíjecí proud	[mA]
$K$	kapacita	[mAh]
$K_f$	koef. proporcionality toč.mo	[-]
$L$	vzdálenost od osy rotace ke středu	[mm]
$M_1, M_2, M_3, M_4$	momenty sil	[N.mm]
$M_x$	celkový mo. kolem osy x	[N.mm]
$M_y$	celkový mo. kolem osy y	[N.mm]
$M_z$	celkový moment	[N.mm]
$N_c$	nosnost dronu	[g]
$R_i$	vnitřní odpor	[mΩ]
$R_m$	modul v tahu	[MPa]
$R_p$	mez kluzu	[MPa]
$T$	čas	[s]
$U$	napětí	[V]
$U_n$	napětí dronu	[V]
$U_k$	mechanické napětí	[MPa]
$f, n$	otáčky	[ot.min]
$g$	gravitační zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
$kV$	počet otáček na volt	[ot/min·V]
$m$	hmotnost	[kg]

$\rho_k$	poměrné posunutí	[mm]
$t$	tah	[g]
$t_{c20^\circ}$	teplota tání při 20°	[°C]
$t_D$	doba letu dronu	[min.]
$t_n$	doba nabíjení	[min]
$t_v$	teplotní výchylka	[°C]
$v_d$	rychlost dronu	[km/h]
$\phi$	úhel naklonění dronu	[°]
$\eta$	efektivita	[g/W]
$\rho$	hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho(x)$	funkce hustoty	[-]
$\omega$	úhlová rychlost	[rad./s]
$\Omega$	referenční doména	[-]

# 1. Úvod

V dnešní době se stále více a více dostává do popředí robotika konkrétně v oblasti bezpilotních dronů, jelikož součástky pro samotnou stavbu jsou čím dál levnější, než tomu bylo kdysi. Drony mohou být ovládány buďto na základě předem naprogramovaného letového režimu, nebo komplexně automatickým systémem. Drony jsou stále více využívány ať už v dopravě poštovních balíků, stavebnictví nebo ve vojenství. Dále se používají pro mapování velkých prostorů, jako jsou výškové stavby či povrchové doly a pomáhají tak v těžko přístupných místech a tím lidem šetří čas. Velikou výhodou je, že drony uvezou mnohonásobně větší hmotnost, než je samotná jejich vlastní váha. Světový rekord, který je zapsán v Guinessově knize rekordů, činí 61 kg, kde šlo o spojení osmi hexakoptér se 48 motory.

Existují různé druhy konstrukcí, které se liší převážně počtem ramen, na nichž je potom připevněn motor a následně vrtule tvořící vztlak, který je potřebný pro to, aby koptéra vůbec vzlétla. Stabilita těchto dronů je pak ovlivněna počtem ramen. Čím více má ramen, tím lepší je stabilita i ovládání. V práci jsou popsány všechny druhy koptér, které jsou běžně využívány.

Cílem této práce je konstrukční návrh rámu dronu, který projde procesem topologické optimalizace a následnou stavbou v kompletní dron. Byly vymezeny zátěžové stavy a jejich odůvodnění. Práce dále obsahuje teoretickou část, v níž jsem nastínil historii dronů a jakým způsobem se dostaly do využití v dnešní době. Tato část také popisuje, jak se provádí topologická optimalizace a její typy.

Dále jsem nastínil problematiku bioniky, která spojuje přírodu se strojním inženýrstvím, a tak doplňuje inženýrství o krásné přírodní prvky. Ty jsou využívány hlavně v architektuře a je třeba připodobňována k určitým zvířatům a podle toho se odvíjí např. okruh v letectví. V kapitole 2. je popsán vývoj dronů a dále je rozebrán princip letu dronu, jakým stylem létá a jaké stavy mohou nastat při letu dronu v terénu. V kapitole 3. pojednávám o topologické optimalizaci a o jejích typech. Závěr této kapitoly je věnován bionice.

V kapitole 4. je popsán celý postup optimalizace mého navrženého rámu. Poté jsou vypsány všechny komponenty pro stavbu. Ve výpočtové části je proveden výpočet sil a momentů, které působí na dron, když je ve fázi letu. V 5. kapitole jsou uvedené očekávané předpoklady a mé výsledky, kterých jsem dosáhnul (např. o kolik je dron lehčí, kolik je jeho hmotnost nebo také celková cena sestavy). V závěru je pro přehlednost uvedena tabulka veškerých potřebných parametrů. Pod tabulkou jsou dále okomentovány všechny veličiny a některé doloženy vzorečky.

## 2. Současný stav

### 2.1. Vývoj a rozdělení základních dronů

Co to je vlastně dron? Toto slovo pochází z anglického „drone“ a má více významů – dřív, včelí trubec, anebo také autonomní nebo dálkově řízený bezpilotní prostředek. Původ tohoto slova se datuje k roku 1935, kdy admirál americké armády viděl předváděcí akci britského námořnictva ke cvičnému létajícímu cíli DH 82B Queen Bee, z angličtiny jako včelí královna. Jednalo se o dálkově řízený dvouplošník, na němž si pozemní jednotky trénovaly protiletadlovou palbu. Americkému admirálovi se nápad natolik zalíbil, že zaúkoloval vlastní odborníky, aby vymysleli něco velmi podobného. Americkým létajícím cvičným cílům pak dali název „Drone“ (z angl. včelí trubec). [1] [2] [4]

Po neúspěšných pokusech z první a druhé světové války se až do šedesátých let dvacátého století používaly bezpilotní letadla převážně jako prostředky terče pro střelbu. Ty doletěly na místo určení a následně vybuchly. Později se začaly využívat jako průzkumné zařízení, jako například ve válce ve Vietnamu. Avšak nahradily je satelity na oběžné dráze. Drony měly nějakou dobu odmlku a až v roce 1995 vzlétl první moderní dron, tak jak ho všichni známe. Jednalo se o verzi RQ-1/ MQ-1 Predátor postavený General Atomics – USA. [1] [2] [4] Místo označení dron se spíše používá slovo koptéra, multikoptéra, kvadroptéra nebo FPV model.



Obrázek 1 - RQ-1/MQ-1 Predátor od firmy General Atomics [3]

## 2.2. Typy dronů

Letadlo bez posádky – UAV (Unmanned Aerial Vehicle) je běžné označení pro dron. Drony obecně můžeme rozdělit do několika kategorií, podle toho, k čemu jsou určeny nebo podle konstrukce. Podle účelu máme buďto hobby nebo vojenské. [2] [4]

## 2.3. Rozdělení dronů podle konstrukce

### 2.3.1. Trikopty

Jedná se o konstrukci se třemi rameny, které vůči sobě svírají úhel  $120^\circ$ . Jako pohon jsou zde umístěny na každém konci elektromotory. Tento typ je specifický tím, že není bezprostředně vyrovnaný točivý moment, tzn. že dva rotory se točí doprava a jeden doleva, nebo naopak. Vykompenzovat tento jev můžeme klopením do stran zadního motoru, tím dojde k lepší obratnosti. Velkou nevýhodou tohoto typu je nízká stabilita a také vysoká spotřeba elektrické energie, protože elektromotory se neefektivně rychle otáčejí a při výpadku jednoho motoru se dron neudrží ve vzduchu a spadne. [2] [5] [6]



Obrázek 2 – Trikopty [7]

### 2.3.2. Kvadroptéry

Jedná se o nejběžnější a nejpoužívanější typ z řady multikopty. Tato konstrukce se skládá ze čtyř ramen. Vyznačuje se vyšší stabilitou, nízkou cenou a snadným návrhem řídicího systému. Existuje docela velká škála typů konstrukcí. Nejvíce známé a nejpoužívanější jsou ve tvaru písmene H a X nebo také případně +. Takovou menší raritou je konstrukce do písmene Y, v tomto případě se nejedná o trikopty, ale opravdu o kvadropty, kdy na zádi blízko sebe se nacházejí dva protichůdné motory. Značnou výhodou oproti trikopty je, že nedochází k naklápění zadního rotoru, a tudíž se pohyb dronu ovládá změnou otáček jednotlivých elektromotorů a odpadá nám na této konstrukci servo. Za nevýhodu považujeme to, že je méně obratnější než trikopty. Platí zde pravidlo, že dva motory jsou pravotočivé a další dva levotočivé. Hlavním důvodem, tak je, aby byl zachován nulový moment setrvačnosti v klidu. [2] [5] [6]



Obrázek 3 - Kvadroptéra Nine Eagles Galaxy Visitor 6 [8]



Obrázek 4 - Y4 – Koptéra [9]

### 2.3.3. Hexakoptéry

Konstrukce je tvořena šesti motory, které vytvářejí pravidelný šesti-úhelník. Tato konstrukce je už schopná, pokud to řídicí jednotka umožňuje, letět při rozbití jednoho nebo dvou motorů z šesti. Na rozdíl od kvadroptéry disponuje větší nosností a stabilitou, a proto se používají hexakoptéry pro nošení závěsného fotoaparátu či kamery pro profesionální použití, a tak mohou tvořit vysoce kvalitní snímky. Platí zde stejné pravidlo jako u kvadroptéry, že polovina motorů je levotočivá a druhá pravotočivá, aby byla dodržena podmínka stability. Nevýhody, které má tento typ, jsou vyšší náročnost při stavění, vyšší rozměry a cena. [2] [5] [6]



Obrázek 5 - Hexakoptéra DIY S550 [10]

### 2.3.4. Oktakoptéry

Jako poslední typ z multikoptér je oktakoptéra, která obsahuje osm motorů tvořících pravidelný osmi-úhelník. Tyto koptéry naleznou využití opravdu jen v komerční sféře. Jelikož obsahují už i optoelektrické zařízení nebo zrcadlové fotoaparáty, je třeba investovat už do opravdu kvalitních motorů, regulátorů a také do řídicí desky. Jedna z největších investic v tomto typu koptéry je akumulátor. Výhoda tohoto dronu je, že i při výpadku více elektromotorů je schopen bezpečně přistát. Proto je vhodný k přenosu drahého vybavení. Opravdu stojí za zvážení pořizovat si tento typ pro vysokou cenu a rozměry dronu. [2] [5] [6]



Obrázek 6 - Profesionální oktakopty [11]

#### 2.4. Rozdělení podle druhu rámu a jejich velikosti

Rám je základním prvkem celého dronu, protože slouží jako nosná konstrukce ostatních komponent. Při jeho výběru je vhodné dbát na to, aby se sestavoval pohodlně a aby nebylo příliš obtížné do něj „nacpat“ všechny ostatní elektrické díly. [2]

Rámy se dělí v zásadě na dva typy, podle tvaru písmen X a H. Rámy typu X jsou více používané, protože jsou lehčí než typ H. Rámy typu X jsou často využívány na závodní létání a baterka bývá upevněna pod rámem. Rámy typu H jsou masivnější a těžší. Poskytují více prostoru pro stavbu a baterka se spolu s HD kamerou upevňuje na horní pláto rámu. Některé rámy kombinují uhlíkové díly s hliníkovými, ale vždy záleží na konkrétní konstrukci, jestli to je užitečné nebo spíše na škodu. Při výběru rámu je dobré si stanovit, na jaký typ létání koptéra bude sloužit. Pokud má být závodní, tak vybrat typ X, kde rám je přizpůsoben tomu, že má dobře kryté komponenty, hlavně kameru. Naopak na freestyle je potřeba více místa pro upevnění, např. GoPro. [2]



Obrázek 7 - Rám typu H [2]





Obrázek 8 - Rám typu X [2]

Rámy se dále dělí podle velikosti, kdy se bere jako hlavní rozměr úhlopříčná vzdálenost motorů, např. 250 mm, 210 mm, 160 mm. Tyto řady velikostí poté odpovídají tomu, jak velké maximálně dokáže pojmout vrtule, tedy např. 6", 5", 4" 3", ale i miniaturní 2". Velikosti vrtulí se uvádí v palcových rozměrech a je zvykem takto označovat i odpovídající velikost rámu. Standardní velikost je 210 mm a tedy 5" vrtule. Důležitá je tloušťka ramen, ta jsou při nárazech nejvíce namáhána. Pokud je uhlík kvalitní, u 5" rámu stačí tloušťka 4 mm. [2]

## 2.5. Princip letu dronu

Pro jakýkoliv pohyb dronu se používají motory, k nimž jsou připevněny vrtule, které tlačí vzduch nahoru, ale také dolů. Když stroj stoupá nebo klesá, všechny vrtule zrychlují, nebo naopak zpomalují. Při letu dopředu či do stran zpomalí vrtule na té straně, na kterou dron zrovna letí. [18] [19]

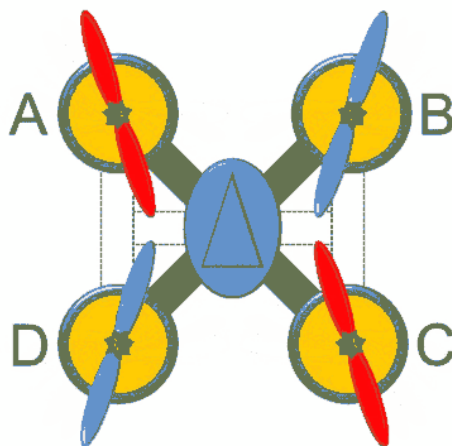
Dron má tři stavy, které mezi sebou nastávají v určitý okamžik. První je definován jako tzv. Křídélka – v anglickém jazyce Roll – jedná se o klonění doprava a doleva. Druhý stav je tzv. Výškovka – v anglickém jazyce Pitch – jde o momenty, kdy se dron naklání dopředu nebo dozadu. A poslední je Směrovka nebo v anglickém jazyce Yaw, kdy dron se otáčí kolem svého středu. Tyto stavy jsou znázorněny na obrázku 9, kde tato problematika je připodobňovaná k naklánění lodi. [2] [18] [19]



Obrázek 9 - Možné situace při letu dronu [18]

### 2.5.1. Vzletání

Když chceme, aby dron vzlétl, tak je potřeba, aby se zapnuly motory a přidal se plyn na určité otáčky. Dron se vznese za předpokladu, že tah je větší než jeho hmotnost  $m$ . U kvadroptér je vždy půlka motorů pravotočivá a druhá půlka levotočivá, což je dáno podmínkou hybnosti. Jinak by žádný dron nevzlétl. [16] [17]



Obrázek 10 - Červené vrtule – levotočivé, modré vrtule – pravotočivé [16]

### 2.5.2. Vznášení

Pokud jde o tento pojem, jedná se o stav, kdy celkový tah motorů se rovná hmotnosti dronu. Jde o stav, kdy dron stojí na místě ve vzduchu. [16] [17]

### 2.5.3. Klonění

Při klonění je důležité, aby jedna strana motorů zpomalila své otáčky a druhá je zvýšila. Je to z toho důvodu, aby byla dodržena podmínka nulového čistého točivého momentu. Tzn. když chceme, aby se dron pohyboval na levou stranu, musí se zvýšit otáčky na pravé straně motorů a zároveň na levé straně se musí ubrat. Tím dodržíme podmínku. [16] [17]

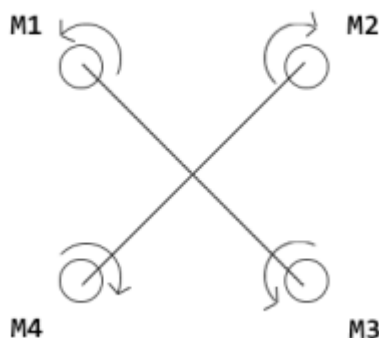
### 2.5.4. Klopení

Klopení je stav, kdy dron se klopí dopředu nebo dozadu. Princip je založený také na podmínce nulového čistého točivého momentu. Tzn. pokud chceme, aby se dron pohyboval dopředu, musí se zvýšit otáčky na zadních motorech a zároveň na předních snížit. Pokud bychom chtěli, aby dron „couval“, musí se udělat opačná operace. [16] [17]

### 2.5.5. Otáčení

Jde o situaci, kdy chceme, aby se dron otočil na místě kolem své osy a nemusel se velkým obloukem se otáčet. Dron zastaví, uvede se do stavu vznášení a otočí se. Proces otočení nastává

tehdy, když motory na jedné diagonále (M1 a M3) své otáčky zpomalí a na druhé diagonále naopak zrychlí (M2 a M4). Princip otočení je uveden na obrázku 11. [16] [17]



Obrázek 11 - Princip točení [5]

## 2.6. Legislativa a rizika

S rozšířením a popularizací dronů mezi veřejností se začala probírat také otázka možných rizik a zneužití. Spolu s ní začalo docházet k postupné tvorbě legislativního rámce pro tuto technologii, a to jak pro komerční sféru, tak pro hobby využití. [29]

Nejprve je nutno konstatovat, že tvorba těchto zákonů a pravidel je zatím na úplném začátku a velmi se liší v jednotlivých zemích světa. Ve většině případů má odpovědnost za regulaci místní letecký úřad, ministerstvo dopravy apod. (případně analogické instituce v dané zemi), ale existují i země, kde otázka dronů není legislativně zatím řešena vůbec, nebo naopak země, kde je tato technologie pro komerční využití bez výjimek zakázána. Pokud legislativa v dané zemi existuje, vychází ve velké míře z již existujících zákonů pro civilní provoz klasické letecké techniky, což s sebou přináší určité komplikace. Dalším problémem je zaostávání legislativního rámce za rychle se zvyšujícími schopnostmi dronů a z toho vyplývající nemožnost využití všech jejich výhod. Nicméně předpisy ve většině zemí postupně spějí ke stále stabilnějšímu znění a do popředí se dostává také možnost sjednocení předpisů nad rámec jednotlivých států (v Evropě EASA – European Aviation Safety Agency, v USA pak FAA – Federal Aviation Administration). [29]

### 2.6.1. Předpisy v ČR

V ČR má na starosti letecké předpisy Úřad pro civilní letectví. Provoz bezpilotních prostředků určuje letecký předpis L2 – Pravidla létání v Doplněku X. Krátce shrnu, co tento doplněk, který vstoupil v platnost 26.12 2019, obsahuje. [29]

### 2.6.2. Rozdělení do kategorií

Úřad pro civilní letectví dělí uživatele bezpilotních letounů do dvou základních skupin. Pokud jde o rekreační létání s dronem, jedná se o první kategorii, tzv. hobby. Pro tuto kategorii jsou pravidla nejmínějš. Avšak pozor, pokud se jedná o dron, který má více než 0,91 kg, musí být od výrobce vybaven systémem, který dopraví dron na místo jeho vzletu při vybití baterie nebo ztráty spojení atp. Stroje do 0,91 kg užívané k rekreačním či sportovním účelům bezpečnostním systémem disponovat nemusí. Dále platí, že každý dron o hmotnosti nad 0,91 kg je třeba opatřit ID štítkem. Pokud se jedná

o dron ke komerčnímu účelu a má kameru, je třeba provést evidenci stroje i pilota u ÚCL a dále absolvovat praktickou a teoretickou pilotní zkoušku. Po úspěšném složení těchto zkoušek získá pilot povolení k létání, poté může požádat o povolení k provádění leteckých prací. Všichni profesionální piloti už jsou povinni vést si pilotní deníky. V závislosti na místě realizace musí piloti hlásit ÚCL, majitelům pozemků a dalším institucím události spojené s provozem dronu a následně provádět reporty. Pilotní licence a povolení k létání jsou nutností i pro hobby piloty řídící systémy těžší než 25 kg. Další kategorie jsou 0,91 – 7 kg a 7–25 kg. [29]

### 2.6.3. Povolené vzdálenosti

Žádný stroj není stoprocentně bezporuchový. A i proto je třeba dbát na bezpečnou vzdálenost jak od lidí, tak od budov, popřípadě dalších překážek. Dodržování pravidla bezpečné vzdálenosti **10-30-50m** je povinností pilotů všech strojů o hmotnosti do 7 kg. Pro kategorii 7–25 kg se aplikuje přísnější pravidlo bezpečné vzdálenosti **50-100-150m**: neboli hobby i profi pilot provozující létání s bezpilotními systémy za komerčním účelem musí během vzletu i přistání dodržovat minimální horizontální vzdálenost od osob 50 metrů. V průběhu letu se nesmí přiblížit k osobě či budově na horizontální vzdálenost menší než 100 metrů a k hustě osídlenému prostoru na vzdálenost do 150 metrů. Tato pravidla platí i pro vlastníky dronů s hmotností nad 25 kg, provoz těchto strojů navíc vyžaduje dozor. Dozorem se rozumí poučená osoba. Vzdálenostní limity se samozřejmě netýkají samotného pilota a osob, které jsou přímými účastníky provozu bezpilotního systému. Z pochopitelných důvodů není v žádném případě povoleno létat v krajní blízkosti mraků. Vzdušný prostor, který nás zajímá nejvíce a v němž je až do výšky 300 metrů při dodržování místních předpisů dovoleno létat, jak nám „vrtule narostly“, nese oficiální přízvisko třída G. Zde se postačí držet vně oblak. V řízeném okruhu letiště (CTR) a na letišti s neřízeným provozem (ATZ) je minimální vzdálenost stanovena striktně a to na 1500 metrů horizontálně a 300 metrů vertikálně. Dále je zakázáno létat v noci – jedinou výjimku tvoří dostatečně osvětlené prostory letiště. [29]

### 2.6.4. Ochrana soukromí

Pro každého dronaře platí stoprocentní zákaz natáčení dalších osob bez jejich výslovného souhlasu. Porušení zákona se tedy můžete dopustit i během přeletu nad soukromým pozemkem. S bezpilotními letadly nelze létat v zakázaných zónách, oficiálně značených jako Prohibited. Tyto zóny zahrnují okolí jaderných elektráren, muničních skladů, skladišť trhavin atp. Další oblastí, kterou je třeba vést v patrnosti, je tzv. Dangerous zóna, v níž sice létání povoleno je, ale může s sebou nést určitá bezpečnostní rizika. Létat je zakázáno rovněž v ochranných pásmech, která jsou např. podél silnic, dálnic, tras telekomunikačních a nadzemních inženýrských sítí, v okolí objektů důležitých pro obranu státu, v okolí vodních zdrojů a ve zvláště chráněných oblastech typu CHKO nebo v národních parcích. Omezené prostory TSA (Temporary Segregated Area) a TRA (Temporary Reserved Area) jsou místa vyhrazená k vojenskému cvičení a jiným domobranným účelům. Provoz bezpilotních systémů je zde zakázán pouze ve dnech nebo popřípadně jen v hodinách, kdy jsou prostory aktivně využívány.

Letištní zóna ATZ, neboli Aerodrome traffic zone, označuje vzdušné prostory kolem letišť s neřízeným provozem. Hranice této zóny utváří kružnice s poloměrem 5.5 km od vztažného bodu letiště. Zákon říká, že s modely do hmotnosti 0.91 kg zde můžete létat zcela svobodně, a to až do

výšky 100 metrů nad zemí, avšak mimo ochranná pásma daného letiště. Ochranná pásma v okolí letišť bohužel nejsou veřejně dostupná. [29]

Vzdušné prostory s označením CTR jsou řízené okrsky velkých letišť. V ČR je takovýchto letišť celkem 9. Ochranné zóny CTR sahají od povrchu země do výšky 1500 metrů AMSL. V tomto případě je třeba dodržovat minimální horizontální vzdálenost 5.5 km a maximální povolenou letovou výšku do 100 metrů nad zemí. S modely lehčími než 0.91 kg lze v řízeném okrsku létat i v menší vzdálenosti, ale opět vždy mimo ochranná pásma daného letiště. [29]

Certifikovaní piloti využívající bezpilotní systémy ke komerčním účelům mohou v případě potřeby žádat o individuální výjimky potřebné k realizaci své zakázky. To znamená, že potřebujete-li například natočit TV spot či provést videodokumentaci v určité „zapovězené“ oblasti, může vám být úřadem civilního letectví uděleno jednorázové povolení, mezi profíky přezdívané HOP. [29]

### 3. Postup konstrukční optimalizace

Každodenním úkolem inženýra je navrhování různých druhů strojních konstrukcí, které musí splňovat požadavky jako pevnostní podmínky nebo tuhost. Podstatným faktem je minimalizovat také ty faktory které zefektivňují tento systém (např. hmotnost, poddajnost). Každý správný konstruktér studuje jak minulé, tak i stávající projekty na kterých pracoval a zkouší kombinovat nové postupy tak, aby objevil něco nového. Tomuto jevu se říká syntéza. Tzn. že konstruktér postupuje podle známých matematických rovnic a jiných informací tak, aby dosáhl určitého zlepšení, také se snaží vycházet z existující skutečnosti, ale upraví ji tak, aby určitým způsobem splňovala požadovanou změnu (změna okrajových podmínek). Pokud se neklade důraz na tyto jevy, jedná se o empirické konstruování, které je založeno na skutečnosti. Pokud se přihlíží k těmto jevům, pak se jedná o tzv. metodu pokusu a omylů. Něco se vyzkouší, zanalyzuje, a pokud vyhovuje účelovým požadavkům, tak se takovému projektu vyhová. Tomuto konstruování se říká konstruování evoluční. Určitým stylem jde vpřed. Tento typ je v dnešní době velice populární a nelze se ho úplně zbavit, protože nikdy si buď samotný konstruktér nebo tým nemůže uvědomit všechny vnitřní nebo vnější vlivy, kterým bude daná konstrukce nebo její část podléhat. [12]

Složitě analýzy, které v dnešní době umožňují strojní programy jako například program Altair Inspire vedou k nutnosti provést změny, a to opět intuitivní. Poté může dojít k následné analýze. Tento proces probíhá do té doby, než vyhovuje daným požadavkům (např. konstrukce splňuje pevnostní kontrolu, nebo obsahuje velmi malé množství napětí v samotné konstrukci). O tomto návrhu však nelze stoprocentně říci, že je nejlepší podle zvolených hledisek. V dnešní době se empirické a evoluční konstruování stává spíš jakýmsi doplňkem k racionálnímu pojetí navrhování konstrukcí. Nazývá se konstrukční optimalizace. [12]

Průběh konstrukční optimalizace se skládá z více fází, které zahrnují poznání vnějších podmínek, dále stanovení kritérií určení optima. Pod tímto slovem definujeme optimální uspořádání konstrukce jak podle typologie, tak tvaru a rozměry. Je to takové uspořádání, kde je podle předem zvoleného hlediska vybráno to nejlepší ze všech uspořádání, která jsou přijatelná při určitých vedlejších podmínkách pro splnění vybraného účelu. Další fází jsou specifické formy. Tato fáze obsahuje „dokonalou“ formu konstrukce která se neustále zdokonaluje. Poté co je vybrána forma konstrukce a napsán její matematický model, je nutné provést volbu navrhovaných proměnných. To zahrnuje např. okrajové nebo geometrické podmínky. Poté následuje vlastní optimalizace. [12]

Optimalizaci konstrukcí je možné rozdělit do tří základních částí a to na:

- topologickou optimalizaci
- optimalizaci tvaru
- dimenzování

### 3.1. Topologická optimalizace

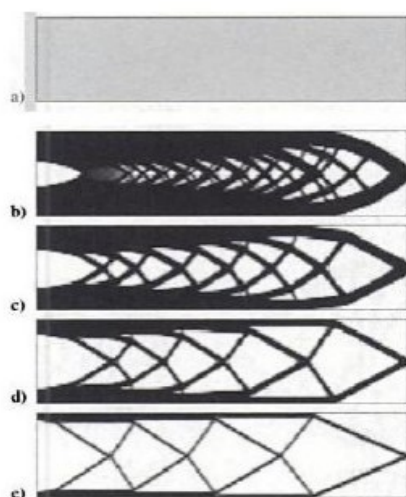
Účelem topologické optimalizace je najít optimální uspořádání struktury v určitém prostředí. Jedinými známými veličinami v tomto problému jsou aplikovaná silová zatížení, možné podmínky podepření nebo také optimalizační kritéria. Optimalizačních kritérií může být několik. Nejčastěji se tím myslí však hmotnost konstrukce, protože když převedeme hmotnost na náklady, tak je to základní hledisko hospodárnosti konstrukce. [12]

#### 3.1.1. Předběžné zpracování geometrie a zatížení

Jako první se vybírá vhodná referenční oblast (pozemní struktura), která umožňuje definovat trakce, pevné hranice. Vybere se část referenční oblasti, která by měla být navržena, a části pozemní struktury, které by měly být ponechány jako pevné oblasti nebo mezery. Následně se vytvoří síť konečných prvků pro pozemní strukturu. Tato mřížka by měla být dostatečně jemná, aby popisovala strukturu v reprezentaci bitové mapy s rozumným rozlišením. Síť by také měla umožnit definovat prioritu dané oblasti struktury přiřazením fixních proměnných návrhu těmto oblastem. Síť je během procesu návrhu nezměněna. Nakonec je vytvořený prostor prvků pro nezávislá pole posunů a navrhované proměnné. [12]

#### 3.1.2. Samotný průběh topologické optimalizace

Optimalizace používá analýzu konečných prvků založenou na posunu a schéma kritérií optimálně pro hustotu. Struktura algoritmu je: Proveďte se nejprve počáteční návrh, např. homogenní rozložení materiálu. Opakující se část algoritmu je pak: Pro toto rozdělení hustoty se vypočítá metodou konečných prvků výsledné posunutí a deformace. Vypočítá se shoda tohoto návrhu. Pokud jde pouze o marginální (okrajové) vylepšení oproti poslednímu návrhu, zastaví se iterace. Jinak se pokračuje. Pro podrobné studie se zastaví, jsou – li splněny nezbytné podmínky optimality. Vypočítá se aktualizace proměnné hustoty. Tento krok se také skládá z vnitřní iterační smyčky pro nalezení hodnoty multiplikátoru Lagrange a pro omezení hustoty. Pro případy, kdy jsou části konstrukce pevné (pevné nebo neplatné), by se aktualizace proměnných návrhu měla vyvolat pouze pro oblasti pozemní struktury, které jsou přepracovány (vyztuženy). Pro danou sadu vnějších podmínek mohou být generovány různé topologie v závislosti na tom, jaký je k dispozici podíl objemu u navrhované konstrukce. Rozdělení materiálu konzolového nosníku je optimalizováno pro maximální tuhost při různých objemových vazbách dle obrázku. [12]

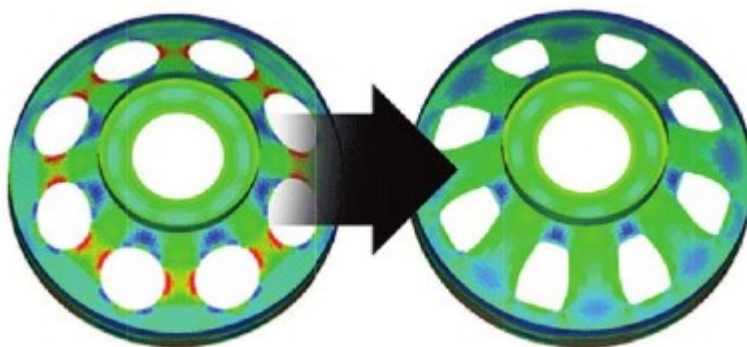


Obrázek 12 - Konzola nosníku optimalizována pro b) 80%, c) 60%, d) 40%, e) 20% podílu objemu [12]

Z obrázku 12 je zřejmé, že nižší podíl objemu má za následek, že se konstrukce začíná podobat příhradové konstrukci.

### 3.2. Optimalizace tvaru

Cílem optimalizace tvaru je navrhnout strukturální hranice nebo díry ve struktuře, jak je znázorněno na obrázku 5. Tuto metodu lze prakticky použít ke zlepšení místních výkonů, jako je například rozložení napětí. Kvůli parametrizaci hranic často existuje malý počet geometrických návrhových proměnných. Protože okrajová podmínka přímo mění geometrický model, je vždy třeba pečlivě zvážit analýzu tvarové citlivosti s ohledem na geometrické návrhové proměnné. Způsoby dimenzování a optimalizace tvaru jsou samozřejmě podrobné postupy návrhu, aniž by se měnila specifická topologie struktury. [13]



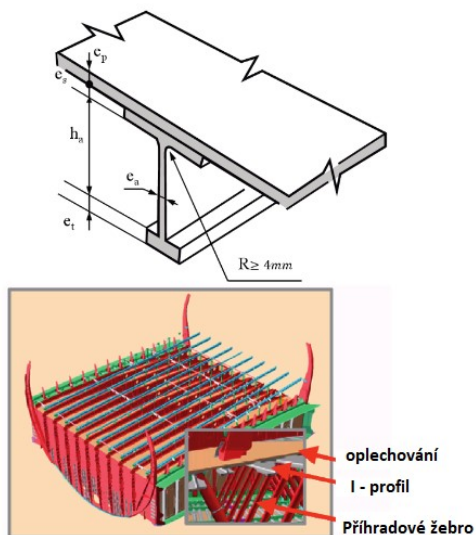
Obrázek 13 - Tvarová optimalizace děr v tenkostěnné struktuře [13]

### 3.3. Dimenzování

Dimenzování je klasická metoda a snadno se provádí volbou průřezových rozměrů nosníků, nosníků a ráků nebo tloušťek membrán, desek a skořepin jako konstrukčních proměnných, jak je

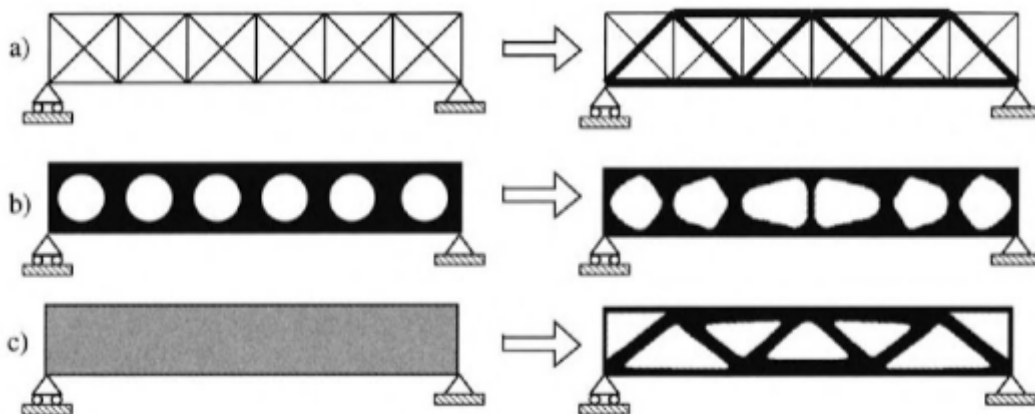


znázorněno na obrázku 14. Optimalizaci velikosti lze považovat za podrobný postup návrhu strukturálního modelu, který zahrnuje velké množství návrhových proměnných. Byl vyvinut vyspělým způsobem a stává se nejoblíbenější metodou v inženýrské komunitě. [13]



Obrázek 14 - Příklad dimenzování [13]

### 3.4. Srovnání všech metod



Obrázek 15 - Srovnání variant optimalizace a) dimenzování, b) optimalizace tvaru, c) topologická optimalizace [13]

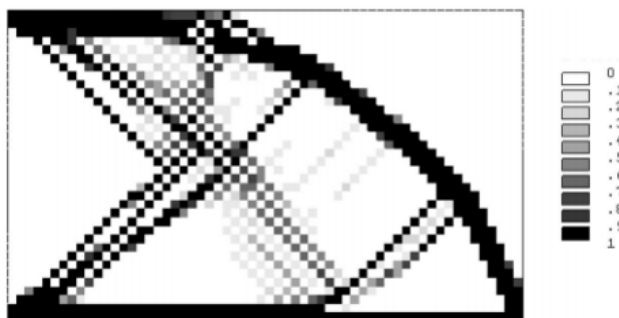
### 3.5. Následné zpracování výsledků

Interpretuje se optimální rozložení materiálu jako definice tvaru například ve smyslu zobrazení CAD. U výše uvedené metody by se v počáteční fázi mělo rozhodnout o výběru základního interpolačního schématu, například SIMP. Je zajímavé, že optimalizace topologie pomocí například SIMP s vhodnou vysokou hodnotou energie  $p$  vede k velmi dobře definovaným návrhům sestávajícím téměř výhradně z oblastí s materiálem nebo bez materiálu a velmi malé oblasti s mezilehlou hustotou materiálu, tj. velmi šedá. [13]

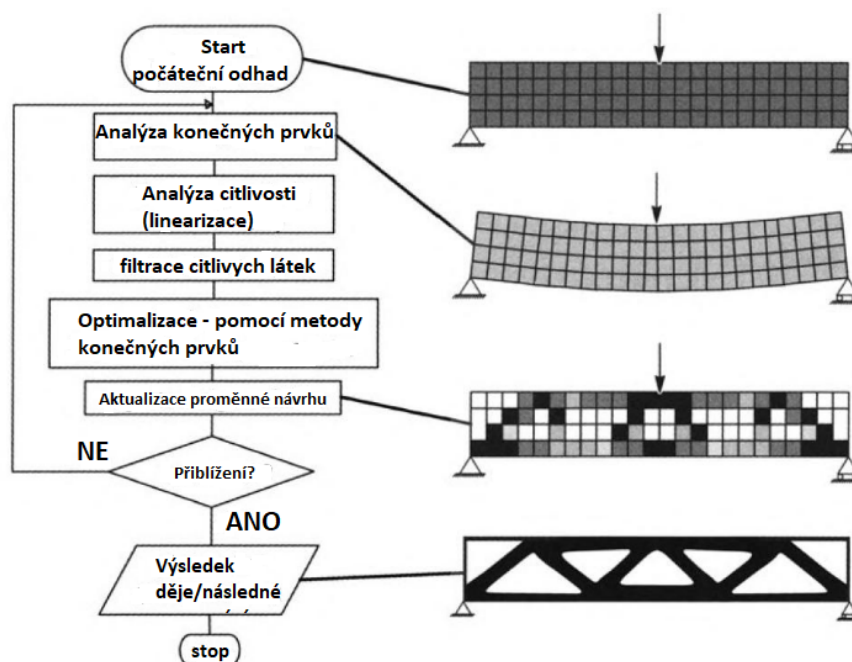
Je důležité zdůraznit, že právě popsaný algoritmus lze implementovat na jakýkoli typ sítě konečných prvků a jakýkoli typ referenční domény  $\Omega$ . To dává této metodě značnou flexibilitu, pokud jde o definování okrajových podmínek a nekonstrukčních částí struktury. Nicméně v mnoha z nich pracuje s obdélníkovými nebo krabicovými doménami a se sítí tvořící čtverce nebo kostky. To zjednodušuje implementaci a může být použito k urychlení analytické části postupu. [13]

#### 3.5.1. Metoda SIMP

Metoda SIMP je často využívána ve výzkumu a v komerčních softwarech pro topologickou optimalizaci. Také je nazývána jako metoda umělé hustoty a působí tak, že udržuje diskretizaci pevných konečných prvků a sdružuje se s funkcí hustoty  $p(x)$  jednotlivých konečných prvků, jejichž hodnoty leží mezi 0 a 1. Nula znamená prázdný prostor a jedna pevnou látku. Střední hodnoty vytvoří umělý materiál, který může být interpretován, jako materiál mezostruktury s otvory. Konečný návrh konstrukce má černé oblasti označující pevnou oblast, bílá oblast označuje dutiny a šedé oblasti označují přechodnou hustotu. Tyto šedé oblasti se mohou potlačit nebo odstranit z konečného návrhu a následné výroby různými technikami. [13]



Obrázek 16 - Příklad topologické optimalizace konzolového nosníku metodou SIMP [13]



Obrázek 17 - Tok výpočtů pro návrh topologie pomocí metody distribuce materiálu a metody pohybu asymptot [13]

### 3.6. Bionické konstrukce

Přírodní tvary jsou původně efektivní a vzhledem k estetice jsou také uspokojujivé a způsobilé. Ačkoli ve světě inženýrství efektivní schéma neznamena úspěšný design v estetice. Existuje spousta struktur, které jsou efektivní, ale nemají žádnou estetickou hodnotu. Spojení schématu s přirozenými tvary a pravidly může této nedokonalosti zabránit a může pomoci technikům sjednotit oblast kvality s reálnými a praktickými požadavky na strukturu. Návrháři začali uplatňovat dva styly pro použití a napodobování přírodních forem. V prvním stylu je cílem designéra pouze napodobovat vnější vzhled přírodních forem, takže budova bude pouze odrážet objevenou krásu okolního prostředí. Ve druhém stylu je návrhář inspirován k vytvoření nového designu procesem, který vytvořily přirozené tvary. [14]

Bionika, také nazývaná jako biometrika nebo tzv. kreativní přírodní inženýrství. Jedná se o metodiku biologických metod a systémů existujících v přírodě používaných v inženýrství a nových technologiích. Bioniku začal používat v roce 1950 Otto Schmitt a Jack Steal, když pracovali na vesmírném projektu v letecké stanici Right Peterson v USA. Začali už tehdy uznávat bioniku jako vědu o systémech založených na živých tvorech. Jedním z nejtradičnějších symbolů této vědy je použití nepropustné barvy směřující k vodě, kterých bylo dosaženo pozorováním nepropustného povrchu květiny leknínu. Tomuto efektu se říká leknínový efekt. [14]

Obecně lze uvažovat o 3 biologických úrovních, které lze na základě nich modelovat moderní technologie:

- imitace z přírodních produkujících metod

- imitace z mechanismů existujících v přírodě
- studium organizovaných principů založených na sociálním chování a organismů

Během historie lidstva došlo mnohokrát k tomu, že se lidé snažili něco vymodelovat po vzoru přírody. První vědecké projekty v této souvislosti však provedl Leonardo Da Vinci. Pokoušel se postavit létající stroj studováním ptáků za letu. Přestože nemohl uspět, jeho pokus byl znám jako první biometrická studie po celém světě. [14]



Obrázek 18 - Leonardův létající stroj [15]

### 3.6.1. Bionické konstrukční metody

#### 3.6.1.1. Konstrukční metoda sloupů

Jako první metoda, kterou všichni moc dobře známe, je konstrukční systém uplatňovaný na sloupech. V přírodě se tento jev vyskytuje u vysokých rostlin, které mají mnohonásobně vyšší než jejich průřez a dokáží odolávat silám okolního prostředí (déšť, vítr). Například v klasu pohanky; poměr průměru plev k jeho výšce je 1/500. Hmotnost klasu je o něco více než 1,5krát větší než stopka. Výška cukrové třtiny je přibližně 3 metry a její průměr stonku je 15 milimetrů. Silný vítr může ohýbat pouze větve rostliny, kořen zabraňuje přelomení do jistých mezí, protože vykazují určitý stupeň elasticity. Těchto poznatků se využívá při stavbě mrakodrapů. [14]

#### 3.6.1.2. Struktura stylu kůry

Hledání prostředí, budovy ve tvaru kupole jsou snadno k nalezení (vejce, ořechy, břídlíce zvířata, listy). Tyto struktury s velmi úzkými stěnami se ohýbají v prostoru a díky svým hladkým tvarům a pruhovaným prvkům mohou síly rovnoměrně rozšiřovat. Unikátní, ideální struktura s ohledem na stabilitu je pouzdro na vejce. Vlastnosti této struktury nejsou jen její geometrický tvar. I když průměr

pouzdra na vejce je 0,3 milimetru, bude mít sedm vrstev, z nichž každá má svou vlastní činnost, a elastický kryt, který obklopuje vnitřní stranu vajíčka, se změní na strukturu s protahovací silou. Tyto struktury jsou nejrozšířenější šablonou pro stavbu obrovských prostorů s velkou vzdáleností mezi hlavními sloupy (pavilóny, kina, divadla) a nepotřebují tolik materiálu, téměř všechny jsou lehké a hloubka bočních stěn se pohybuje okolo 7 mm. [14]



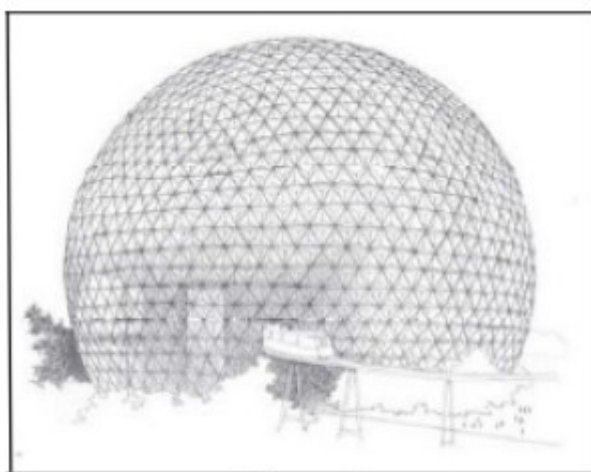
Obrázek 19 - Kůrové stavby v architektonických strukturách [14]

### 3.6.1.3. Pružné prutové systémy

Pavučiny jsou jedním ze zázraků přírodní budovy. Jsou silnější než ocelové dráty se stejným průměrem a mají elastickou náklonnost, která jim umožňuje natáhnout se 1,25krát více než ocelové dráty. Tato lehká, jemná a silná struktura upoutala pozornost inženýrů. Inženýři využívají tyto struktury k vytvoření elastických kabelů. Pavučiny jsou používány jako první symboly zavěšených mostních konstrukcí, které jsou svou rozmanitostí považovány za umělecký jev. Vedle pavouka najdeme stejný styl budovy i v jiných přírodních modelech, jako jsou: křídla netopýrů, ploutve pro ryby a ploutve vodního ptactva, ve kterých jsou jejich struktury distribuovány a upevněny na tegmentálním (stropní, střešní, krycí) povrchu. Na rozdíl od elastických kabelů, nosných prvků a ocelové sítě existují některé kabely nebo systémy vyrobené z ocelových kabelů, které mohou nést na svém povrchu různé materiály. Tyto struktury jsou užitečné pro zakrytí prostoru obkročemi. (Průměr stropu olympijského stadionu v Moskvě je pouze 5 milimetrů a jeho plocha je asi 30000 m<sup>2</sup>) [14]

#### 3.6.1.4. Geodetické konstrukce

Příroda je původ šestihranů a trojhranů, které mohou být pozorovány v asférických buňkách nebo bublinách. Ať už se jedná o složité přírodní organismy nebo o jakékoli jiné modely, tyto tvary mohou tvořit novou podobu pod tlakem, která svírá mezi svými osami 120 stupňů. Tyto tvarové povrchy jsou elastické a vyskytují se na nich určité napínací události. Stejně údaje lze vidět na žirafí kůži nebo na želvím krunýři. Ve vnitřních částech úlu vidíme stejné tvary. Včela staví voštinu žvýkáním aluvií včelího vosku a štěrbin slin ve tvaru šestiúhelníku a tyto tvary k sobě drží. Fowler věřil nejlepšímu strukturálnímu pletivu s kulovitým tvarem, šestihran nebo trojhran, který se nazývá geodesik. A geodetická struktura je tvořena nějakou kvadripartitovou koulí a nikdy se nezmění. Tato struktura je pevná, tvrdá, symetrická a jednoduchá kombinace, která obsahuje pozoruhodné prvky v jiném slově, tato struktura je kombinací, která je vytvořena jednoduše, krátce a levně. [14]



Obrázek 20 - Geodetická koule, pavilón Spojených států, 1967 [14]

### 3.7. Funkce přírody a struktury

Tvary v přírodě jsou vytvořeny v přírodě pro nejlepší funkci a přenášejí velké množství energie s použitím nejmenšího materiálu. Timpson ve své knize „o růstu a číslech“ říká, že tvary živých tvorů jsou výsledkem shody s fyzickými silami. Závěru ve své knize „anatomie přírody“ říká, že hodnocení struktury ve formě je moudrou reakcí na život. Forma a struktura jsou ve skutečnosti výsledkem kompromisu s environmentálními pravomocemi. Obvykle všechny přirozené struktury mají texturní vrstvy, které způsobují, že se tyto změny pod tlakem mění a vytváří v nich elastické nebo tlakové reakce. Tento problém je patrný u stonku pšenice nebo silných stromů a používá se při vytváření letadlových struktur a mrakodrapů, které se jmenují monochromní systémy. [14]

Slavné motto „méně je více“ se dosahuje ve světě struktury s cílem získat co nejvíce operací s použitím nejméně materiálu. Některé důležité příklady těchto úspěšných organických tvarů jsou: mnichovský stadion, diplomatický klub v Rijádu a veletrh Manheim. [14]



Obrázek 21 - Diplomatický klub v Rijádu [30]

### 3.8. Příroda a strukturální estetika

Přírodní tvary byly původně užitečné a využívají schémata. V přírodě jsou žádoucí a způsobilé s ohledem na estetiku. Ačkoli ve světě techniky nejsou využívána schémata vždy úspěšnými návrhy založenými na estetice. Připojením schématu k přirozeným tvarům se můžete této slabosti vyhnout. Je velmi důležité vnímat přírodní tvary při vývoji naší základní struktury, kterou vytváří člověk. [14]

Důvod, proč se běžnému člověku nelíbí úplně správný design, nevidí v přírodě nic podobného. Ačkoli oblouk je cenný v estetice, rám není ani krásný ani ošklivý a umístěn mimo umělecký svět. V prostředí jsou konkávní objekty a prvky téměř běžné. Hřebenatka je nejen symbolem ochrany, ale také se považuje za dobře tvarovaný prvek estetiky. [14]

Pantomimické struktury, přestože jsou lehké, předstírají těžkost a jsou srovnatelné s tradičními kamennými kopulemi, které nám nedovolují pochopit jejich strukturální chování a lehce zmátnou publikum. K těmto druhům zmatku nikdy nedochází, když mluvíme o stanech, protože v přírodě jsou i takové symboly, i když v menším měřítku. [14]

Příklady spojení mezi přírodou, estetickou a strukturální funkcí.

Budova Ludwiga Erharda Hause v Berlíně byla postavena Nicolasem Grimem Shawem. Je velkým symbolem tohoto cíle. Opakované oválné oblouky inspirované kostrou hrobu k zavěšení podlah v atriu. [14]





Obrázek 22 - Královský most Albert budova L.E. Hause v Berlíně (14)

Další obdivuhodná budova inspirovaná prsty je vlakové nádraží Waterloo, navrženo Nicolasem Grimshawem.

Ačkoli v minulosti tu nebyl žádný kontakt mezi inženýrstvím a biologií, tak dnes se používají specifické typy strojů a různé mechanismy, které se aplikují v náročných podmínkách. Vztah mezi těmito dvěma jevy je vyjádřen bionikou. Architektura této vědy, stejně jako jiné vědy, je vysoce efektivní a poskytuje skvělé řešení architektům. S novým bionickým přístupem ke konstrukcím se architekti pokouší vybudovat chytře zastavěné plochy a příroda je lépe sladěna. Myšlenky od přírody k architektuře pomáhají spojovat různé síly organizované ve formě jednotek. Složky celkové rovnováhy a složení nemusí být vždy v nějakém určitém vztahu. Vztah mezi přírodou a architekturou se blíží svému vrcholu a částečně kompenzuje nedostatky. Kompenzace nedostatků lidského života v harmonii s přírodou vede ke kompromisům a nedochází k jejímu poškozování. [14]



## 4. Konstrukční návrh dronu

V následujících kapitolách jsem provedl rozbor součástí a zvolil jsem příslušný typ. Na začátku jsem si vybral typ rámu, který byl ve tvaru X. Jednalo se o standartní typ, který je často používán a při výběru správného materiálu má dobré pevnostní vlastnosti. Velikost rámu jsem zvolil 250 mm. Jedná se o vertikální vzdálenost mezi elektromotory. Následně na každý motor byla upevněna 6" vrtule. Vrtule byly zvoleny třílisté z důvodu, aby bylo dosaženo menšího hluku. Následně jsem vymezil komponenty, které jsem potřeboval pro stavbu dronu.

### 4.1. Komponenty pro stavbu dronu

V následující kapitole jsem uvedl, jaké komponenty byly potřeba pro sestavu a proč jsem je zvolil.

#### 4.1.1. Motor

Podle velikosti kvadroptéry se vybírá druh motoru. Pro nejrozšířenější velikost rámu 210-250 mm se používají motory o velikosti 2206, 2306 nebo 2207. První dvě číslíčka označují průměr statoru v milimetrech a druhé dvě číslíčka označují výšku statoru v milimetrech. Velikost motoru je úzce spjata s jeho výkonem. Čím větší motor je, tím má větší výkon a rychlejší odezvu. Na druhou stranu ale větší motor znamená vyšší hmotnost a také vyšší nároky na baterii. Pokud je zvolen příliš silný motor a k němu se připojí slabá baterie, výkon neovlivní a dojde ke zničení baterky. V každé kvadroptéře jsou dva motory CW a dva motory CCW. Tyto zkratky znamenají, že motory se otáčejí buď po směru hodinových ručiček, anebo proti směru hodinových ručiček. Je to z toho důvodu, aby mohla kvadroptéra jak stoupat, tak i klesat. Pokud by motory byly konstruovány tak, že by se točily například jen po směru hodinových ručiček, tak by kvadroptéra mohla jen stoupat. Stejný typ motoru je vždy diagonálně proti sobě v případě kvadroptéry. [2]

Dalším důležitým parametrem je počet otáček na volt (kV), nejčastěji se u 5" rámu používají motory v rozmezí 2300-2600kV. Toto číslo udává, jaký je počet otáček za minutu na jeden volt. Například 2300kV na 4S baterii (14,8 V) znamená bezmála 40 tisíc otáček za minutu. S vyšším kV lze získat vyšší rychlost, ale dochází k vyššímu odběru, to je třeba také zohlednit při výběru bateriek a regulátorů. Pro začátečníky a středně pokročilé je 2300 kV absolutně vyhovující. Většinou totiž platí, že motory s vyššími otáčkami mají menší tah při nižších otáčkách, a hlavně mají menší kroutící moment. Pojem 4S nám říká, že baterie bude obsahovat 4 články, které jsou sériově zapojeny. Podle počtu článků se dá určit maximální napětí. Jeden článek Lipol má 3,7V a když jej vynásobím počtem článků dostanu maximální napětí 14,8 V. [2]

Čím menší motor a vrtule, tím více otáček bude potřeba pro let. Tzn. na daleké a klidné lety jsou vhodnější naopak nižší otáčky, kvůli efektivitě. Pro měření se používají testy statického tahu, kdy se na připevněném motoru zkoušejí různé vrtule. V závislosti na úrovni plynu se měří proud (A), tah (g) a následně se počítá efektivita (g/W), což je poměr výkonu a tahu. [2]

Podrobný výkonnostní test je vyobrazen na stránce miniquadtestbench, kde je motor zatížen čtyřmi různými stavby. [31]

Na základě výše popsaných kritérií jsem zvolil motor RCinpower GTS V2 2207 Plus 2500KV

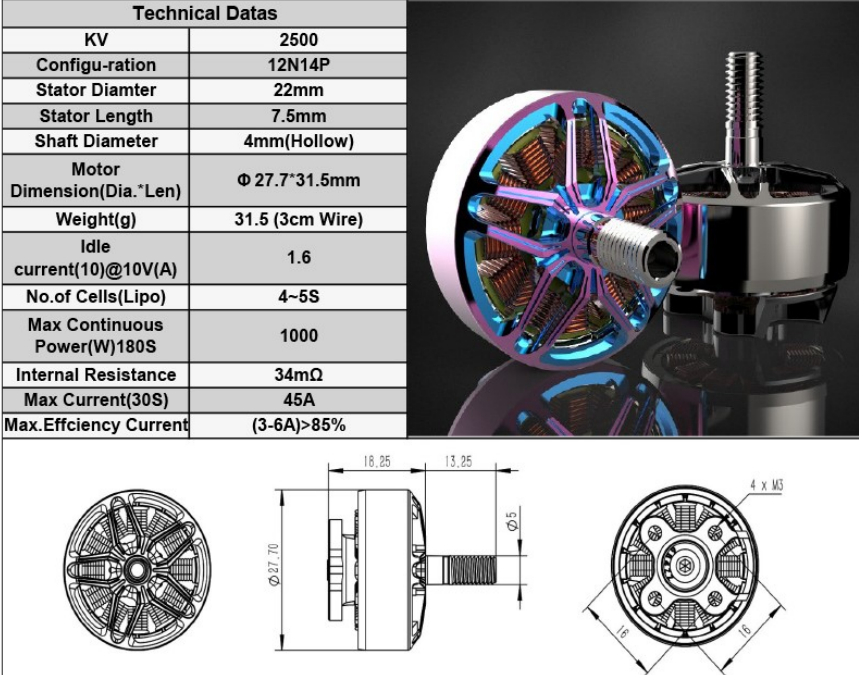


Obrázek 23 - Zvolený motor RCINPower GTS v2 2500kv [18]

Technická data pro volbu vrtulí:

### MOTORS: GTS2207Plus V2 - 2500KV

Technical Datas	
KV	2500
Configu-ration	12N14P
Stator Diamter	22mm
Stator Length	7.5mm
Shaft Diameter	4mm(Hollow)
Motor Dimension(Dia.*Len)	Φ 27.7*31.5mm
Weight(g)	31.5 (3cm Wire)
Idle current(10)@10V(A)	1.6
No.of Cells(Lipo)	4~5S
Max Continuous Power(W)180S	1000
Internal Resistance	34mΩ
Max Current(30S)	45A
Max.Efficiency Current	(3-6A)>85%



Obrázek 24 - technická data k motoru [32]

#### 4.1.2. ESC regulátor

Electronic Speed Controller slouží k řízení otáček jednotlivých motorů na základě povelů z řídící jednotky a přeměňuje stejnosměrný proud z baterie na střídavý. Při výběru jsou důležité dvě veličiny, a to jsou maximální proud a maximální podporované napětí. [2] [5]

Regulátor má dva silové vstupy. Jsou připojené přes PDB přímo na napětí baterky. Existuje i tzv. 4in1 regulátor, což je deska o velikosti řídicí jednotky, na které jsou umístěné 4 regulátory. [2] [5]

Volba ESC regulátoru se odvíjí od maximálního proudu, který motory spotřebují, což je v mém případě 45 A. Proto volím HGLRC Forward FD 50A 32Bit 2-6S, který má konstantní proud 50A a krátkodobý 60A. ESC regulátor v každém případě splňuje podmínku, protože snese proud, který spotřebují motory. Váha jednoho ESC regulátoru je 5,2 gramů. Dá se připojit na 2-6 Li-pol baterii. Pro svou malou velikost je ideální na upevnění na ramena dronu.



Obrázek 25 - Zvolený ESC regulátor [19]

#### 4.1.3. Vrtule

Jde o součástku, která převádí otáčivý pohyb na tah a naopak. Jeden ze základních prvků je počet listů vrtulí. Dvojlisté vrtule se vyznačují vysokou účinností a rychlostí. Kdežto třílisté a čtyřlisté přidávají koptěře na stabilitě a ovladatelnosti. Pro výše zvolený typ motoru jsou doporučené vhodné vrtule kompatibilní s daným motorem. Proto jsem zvolil GF5x4x3. Co se týče tohoto značení, zkratka GF označuje firmu, která je vyrobila, v tomto případě Gemfan. Číslo 5 znamená průměr vrtule v palcích ( $5 \cdot 2,54 = 12,7$  mm). Číslo druhé v pořadí 4 znamená stoupání vrtule, tedy jak daleko se vrtule „prořízne“ vzduchem během jedné otáčky, v mém případě tedy 40 stupňů. To má vliv hlavně na rychlost. Čím vyšší je stoupání vrtule, tím rychleji se dá letět, ale současně motory budou čerpat více proudu, čímž více zatěžují elektroniku a dochází k rychlejšímu vybíjení baterie. Poslední číslo znamená počet listů, to je v mém případě 3 listy. [2] [5]

– Typy vrtulí pro motory 22XX. – GF5\*4\*3:

Prop (inch)	Voltages (V)	Throttle (%)	Load Currencty (A)	Pull(g)	Power(W)	Efficiency(g/W)	Temperature(in full throttle load 15's)
GF5*4*3	16	50%	6.1	588	97.6	6.025	55°C
		100%	27.1	1591	433.6	3.669	
	21	50%	7.9	772	165.9	4.653	63°C
		100%	35.1	2088	737.1	2.833	
GF5*4.5*3BN	16	50%	7.7	685	123.2	5.560	61°C
		100%	33.7	1717	539.2	3.184	
	21	50%	10	899	210.0	4.281	78°C
		100%	42.9	2250	900.9	2.498	
GF5*5.1*3	16	50%	7.9	644	126.4	5.095	73°C
		100%	36.8	1635	588.8	2.777	
	21	50%	10.3	845	216.3	3.907	85°C
		100%	46.7	2045	980.7	2.085	
GF6*4.5	16	50%	9.1	853	145.6	5.859	76°C
		100%	39.4	1978	630.4	3.138	
■ Airplane			□ Helicopter			■ Vtol	

Obrázek 26 - Slouží k určení typu vrtule



Obrázek 27 - Zvolené vrtule Gemfan [20]

#### 4.1.4. Akumulátor

Na základě zvolených kritérií volím akumulátor GENS ACE LIPO TATTU série - 6750 mAh 14,8V 4S1P ze čtyřmi články, které jsou zapojeny sériově s vybíjecím proudem až 50A. Váha tohoto akumulátoru je 600g.

Na mnou navrženou sestavu je potřeba, aby maximální napětí bylo 16 V. Určeno dle obrázku 26, kdy zatížení vrtule na sto procent potřebuje 16 V, aby motor táhnul 1591 gramů. A proto je vhodné použít baterie se čtyřmi články, kde jeden článek dává 3,7V, je potřeba se 14,8 V co nejvíc přiblížit, který je dán vztahem číslo 1:

$$U_b = 4 \cdot U_{\xi} = 4 \cdot 3,7 = 14,8V \quad (1)$$

kde  $U_{\xi}$  je napětí jednoho plně nabitého článku [V]  
 $U_b$  je maximální napětí [V]

Tzn. že první podmínka je splněna. Každý výrobce udává kapacitu baterie. Má konstrukce potřebuje krátkodobý proud 180A, avšak toto nastává maximálně jen pár sekund a to při startu. Maximální proudový odběr s rezervou se udává 65%, což je 120A. Tento proud se porovnává s proudem, který výrobce garantuje při určitém vybíjecím proudu.

**Maximální vybíjecí proud – C:** Jedná se o maximální vybíjecí proud, který se uvádí zejména u lithiových akumulátorů. Na obalu akumulátoru bývá označován číslem a písmenem C. Vynásobením hodnoty C a kapacity dostaneme maximální povolenou velikost vybíjecího proudu. Analogicky se někdy uvádí i maximální nabíjecí proud, běžně se pohybuje v rozsahu od 0.5 do 3C. [2] [21] [22]

Konečná volba akumulátoru spočívala porovnáním potřebného maximálního proudu při vybíjecím proudu, dle katalogu uvádí výrobce maximální proudový odběr 168,75 A při vybíjecím proudu 25C a krátkodobě při proudu 337,5 A vybíjecím proudu až 50C. C mi splňuje další podmínku a baterie tím splňuje všechny podmínky.

**Výpočet kapacity baterie:** Potřebná kapacita baterie je dána vztahem číslo 2:

$$K = I_{op} \cdot t = 60 \cdot 0,1 = 6Ah = 6000mAh \quad (2)$$

kde  $I_{op}$  je odebíraný proud [A]  
 $t$  je předpokládaná doba letu [hod]

U výpočtu kapacity baterie je důležité si zvolit, jak dlouho chci, aby dron létal. V mém případě jsem si zvolil 6 minut tzn. 1/10 hodiny, nebo také jako 0,1h. Proud je dán, jak budou motory zatěžovány, optimálně se budu pohybovat okolo 40%. Což je v mém případě 15A na jeden motor. Tzn. že odebírat budu optimálně ze všech čtyřech motorů 60A.

Podle konstrukce a chemického složení se akumulátory dělí na mnoho různých typů.

Dělení

- Niklokadmiové (NiCd)
- Nikl-metal-hydridový (NiMH)
- Lithium-železo-fosfátové (Li-Fe)
- Lithium-iontové (Li-Ion)
- Lithium-polymerové (Li-pol)

Lithium polymerové akumulátory

Jedná se o nejmodernější zdroj energie pro pohon modelů. Jejich největší výhodou je jejich malá hmotnost a vysoká energetická hustota – tj. velikost uloženého elektrického náboje vztaženého na jednotku hmotnosti. Jmenovité napětí Li-pol článku je 4,2 V (na rozdíl od 1,2 V u NiCd a NiMH

akumulátorů). V provozu nesmí v žádném případě napětí článku překročit 4,7 V při nabíjení a poklesnout pod 3 V při vybíjení. Překročení těchto hodnot znamená s vysokou pravděpodobností nevratné poškození akumulátoru. [2] [5] [21]

Z tohoto důvodu je třeba používat pro nabíjení speciální nabíječe pro Li-pol akumulátory, stejně jako používat speciální regulátory, jejichž ochranné obvody (PCO) zabrání vybití článků pod bezpečnou mez. Nedodržení správného postupu při nabíjení, stejně třeba jako zkrat článku, vede k přehřátí článku a jeho poškození vyvíjenými plyny. Pokud teplota uvnitř článku překročí cca 150 stupňů Celsia, dojde k nastartování exotermní chemické reakce (reakce doprovázená vývojem tepla), která může samovolně pokračovat i při odpojení nabíječe. V důsledku toho může dojít k explozi článku a k vzniku požáru, neboť vystříknutá náplň článku se na vzduchu sama vznítí. Ačkoliv jsou Li-pol akumulátory při správném zacházení zcela bezpečné, toto nebezpečí by se nemělo podceňovat. [2] [5] [21]

Sériově řazené články se označují písmenem „s“ (3s jsou tři články v sérii, sada 3s z 1200 mAh článků má potom jmenovité napětí  $3 \times 3,7 = 11,1$  V, kapacita zůstává 1200 mAh), paralelně řazené písmenem „p“ (3s2p je sérioparalelní kombinace 6 článků; sada 3s2p z 1200 mAh článků má jmenovité napětí  $3 \times 3,7 = 11,1$  V, kapacitu  $2 \times 1200 = 2400$  mAh a je schopna poskytovat dvojnásobný proud). Oproti NiCd a NiMH článkům nevyžadují Li-pol akumulátory úvodní formování, ale je možné, že během několika úvodních cyklů se bude využitelná kapacita poněkud zvyšovat. Li-pol akumulátory také není třeba před nabíjením vybit – je tak např. možno zcela bezpečně nabíjet akumulátory vybité na 50 %. [2] [5] [21]

Výpočet výdrže baterie – doba letu dronu

Pro výpočet doby letu dronu slouží vzorec číslo 3,

$$t_D = \frac{K}{I} = \frac{6}{60} = \frac{1}{10} \text{ hod.} = 6 \text{ minut} \quad (3)$$

kde  $I$  je odebíraný proud všech čtyřech motorů [A]  
 $K$  je kapacita baterie [Ah].

Pokud se překročí nabíjecí proud, tak se baterie zahřívá a při větším nabíjecím proudu může vzplanout, nebo i vybuchnout. Co se týče doby nabíjení, každá nabíječka má udávaný nabíjecí proud v ampérech (někdy je to označováno třeba 2A, a pokud je menší, než 1A, tak se to udává buď 0,8A nebo 800mA tzv. miliampéry). Na výpočet doby nabíjení se používá vzorec číslo 4: [22]

$$t_n = \frac{1,2 \cdot K}{I_D} = \frac{1,2 \cdot 6000}{4000} = 1,8 \text{ hod.} = 108 \text{ minut} \quad (4)$$

kde  $K$  je kapacita baterie [mAh]  
 $I_D$  je nabíjecí proud [mA]



Obrázek 28 - Zvolená baterie [36]

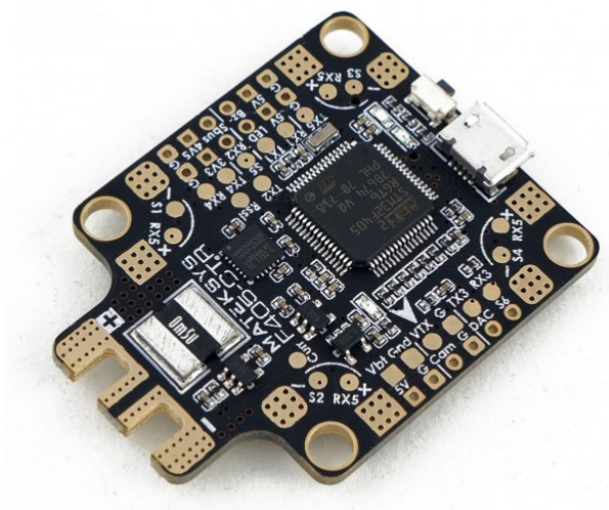
#### 4.1.5. Řídící jednotka

Jedná se o tzv. mozek celého dronu. Tato deska obsahuje kombinaci mikroprocesorů a senzorů. Klasicky jde o tzv. šestiosý senzor, který obsahuje 3 gyroskopy a 3 akcelerometry pro každou prostorovou osu. Vhodný firmware a tyto senzory nepřetržitě vyhodnocují náklon a úhlovou rychlost koptéry a zároveň berou v úvahu signál z RC přijímače, v tomto případě od pilota. Tento princip stačí k tomu, aby se dala rozumným způsobem řídit celá koptéra a aby byla stabilní, předvídatelná. Existuje více druhů desek, které obsahují různé magnetometry (elektronický kompas), barometrický senzor, který udržuje výšku letu v závislosti na tlaku vzduchu. K desce může být připojena samozřejmě GPS která umožňuje naprogramovat dron tak aby letěl po předem nastavené trase a dokázal se vrátit. [2] [5]

S vývojem řídicího firmwaru pomalu stoupají nároky i na rychlost procesoru – jestliže pilot nechce být bržděn, tak optimální označení procesoru je F4, do dražších a vícenákladných koptér se hodí F7. Součástí řídicí desky může být i PDB (power distribution board) – tedy deska, která je určena pro rozvod napětí z baterie a snazší montáž koptéry. Takové řídicí desky je vhodné použít v kombinaci se čtyřmi samostatnými regulátory na ramenou. Jednoduše řečeno je to kus plošného spoje, který usnadňuje pájení. Známé desky jsou: Airbot Omnibus F4, Mamba F4 nebo Matek F405. [2]

Firmware je řídicí software jednotky, který pomocí pokročilých algoritmů zpracovává pokyny od pilota. Na základě toho a informací ze senzorů říká regulátorům, jak mají upravit otáčky motorů tak, aby je to „neuvařilo“. Nejpoužívanější firmware je Betaflight [2]

Volba řídicí jednotky spočívala v tom, jaký odběr mají ESC regulátory a to je 40 A, výrobce udává, že řídicí deska Matek F405 CTR s dodávaným externím kondenzátorem zvládne až 46 A, což v každém případě na zvolenou sestavu stačí. Deska obsahuje i PDB.



Obrázek 29 - Zvolená řídicí jednotka F405 CTR [24]

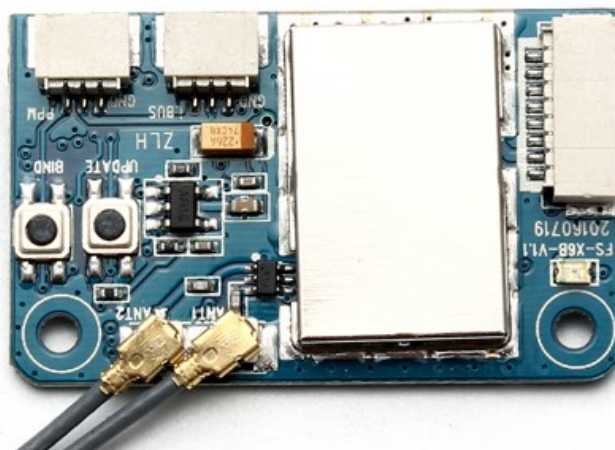
#### 4.1.6. Přijímač

Volba přijímače se odvíjela od toho, jaký máme ovladač. Jelikož v sestavě jsem zvolil ovladač FLYSKY FS – i6 6CH, stačilo najít přijímač, který je kompatibilní s tímto ovladačem. Společnost Rotorama nabízí velice elegantní přijímač FLYSKY X6B přijímač s PPM/i – Bus, který je přímo doporučovaný pro tento typ ovladače.

Povel z vysílačky je v modelu zachycen přijímačem. Přijímače se rozdělují podle počtu kanálů. Např. tři, čtyř, osmi, ale i šestnácti kanálové. Další důležitou věcí je, jaký druh signálu jde z přijímače do řídicí jednotky. Může být PWM, PPM, SBUS, iBUS atd. PWM (Pulse width Modulation) odesílá signál každého kanálu po jednom vodiči. Takže pro základní čtyřmi kanály se potřebují připojit čtyři vodiče. V letadle to nevadí, ale v koptěře by takové množství kabelů jen překáželo a dnes se už PWM na závodních koptérách nevyužívá. [2] [5]

PPM (Pulse Position Modulation), také označovaný jako CPPM, je na tom lépe. Je totiž schopný po jednom signálním vodiči vést hned několik signálů. Zásadní nevýhodu má v tom, že jednotlivé signály posílá za sebou, takže může vznikat pomalejší odezva. Z přijímače je tedy veden signální kabel, napájení a uzemnění. Tyto tři vodiče stačí k tomu, aby se dala koptéra ovládat (klopení, klonění, plyn).





Obrázek 30 - Přijímač kompatibilní s ovladačem Flysky i6 [26]

#### 4.1.7. Ovladač

Volba ovladače spočívala v tom, že bylo potřeba najít skrz komunikaci mezi přijímačem, aby byl kompatibilní, proto volím FLYSKY FS – i6 6CH, který splňuje podmínku a je i cenově dostupný.

Dron lze ovládat několika způsoby. Nejpoužívanější je stále ovládání přes dálkové ovládání pomocí RC vysílače, který je připojen na určité frekvenční pásmo, nejčastěji jde o 2,4 GHz, které využívá většina vysílačů. Dosah standardního ovladače se uvádí až 3 km a v mém případě bohatě postačí. [2]

V následující tabulce jsou uvedeny módy vysílačky. Existuje však hned několik variant, jak se dají nakombinovat pohyby pák při ovládání modelu.

Tabulka 1-Módy používané na vysílačkách [2]

česky	anglicky	funkce
Plyn	Throttle	Zvýšení otáček všech motorů
Výškovka	Pitch/ Elevator	Klopení. Otáčení modelu kolem příčné osy
Křídélka	Roll/ Aileron	Klonění. Otáčení modelu kolem podélné osy
Směrovka	Yaw/ Rudder	Bočení. Otáčení modelu kolem svislé osy

Tyto pojmy jsou hodně důležité při nastavování rádia, případně řídicí jednotky v modelu. Rozlišují se dva základní módy. Mód 1 se vyznačuje tím, že má plyn na pravé páce. Plynová páka je sdílena ještě s kloněním. Levá páka obsluhuje klopení a směrovku. U módu 2 je plyn na levé páce spolu se směrovkou. Z toho plyne, že na pravé páce je klopení a klonění. Dále módy 3 a 4 jsou dosti exotické a jsou kombinací těchto dvou předešlých. Teď je třeba dobře zvolit rádio, které má ty správné funkce a vhodný počet kanálů. Jeden kanál slouží pro jeden povel RC modelu. Na základní ovládání multikoptéry stačí 4 kanály: klonění, klopení, bočení a plyn. Další kanály jsou třeba na ovládání LED diod. [2]



Obrázek 31 - Ovladač FlySky [27]

#### 4.1.8. Doplnující komponenty

V této kapitole jsem uvedl doplňující komponenty, které lze použít také k instalaci, avšak jedná se o komponenty, které nemusí být nutně v sestavě, aby byla schopna letu.

##### SENZORY

Akcelerometr – Tento snímač je určen k měření zrychlení stroje.

Barometr – Tento snímač je navržen tak, aby dron věděl, jak vysoko nad zemí je. To dělá měřením tlaku. Vzhledem k tomu, že se tlak vzduchu mění s nadmořskou výškou, dron může určit svou vlastní výšku pomocí barometru.

Gyroskop – Gyroskop je určen k měření úhlové akcelerace na ose X, Y nebo Z. V zásadě je zodpovědný za to, že umožní dronu létat stabilním způsobem.

GPS – (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem) česky „globální polohovací systém, umožňuje GPS satelitům určit polohu dronu, takže pilot (vy) může např. nastavit dronu specifické souřadnice k letu, nebo dokonce přivolat dron zpět do původní polohy vzletu, i přestože není ve vašem zorném poli. [28]

##### VIDEO

FPV – (**F**irst **P**erson **V**iew) česky „zobrazení první osobě“, je termín, který definuje možnost živého videopřenosu do vašeho telefonu nebo tabletu, o nějž, se při přenosu stará kamera na dronu.

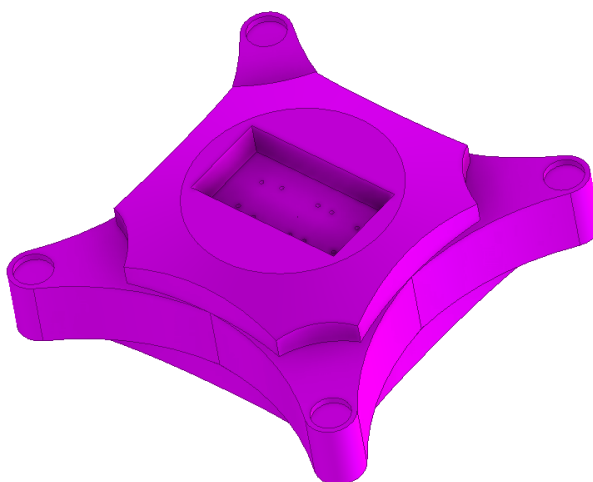
LCD – (**L**iquid **C**rystal **D**isplay) česky „displej z tekutých krystalů“, je typ obrazovky sloužící k zobrazení obrazu přicházejícího z přijímače. [28]

Gimbal – je zařízení, které během letu zajišťuje kameru a umožňuje jí poskytovat stabilní, neroztřesené záběry.

GoPro – jsou populární sportovní / akční kamery, které mohou být (se správným držákem) připojeny i k dronům. [28]

#### 4.1.9. Rám

Rám jakožto nejdůležitější a největší část celé sestavy prošla prvotním návrhem, který je znázorněn na obrázku č.32. Tento návrh bude následně podroben topologické optimalizaci v inženýrském programu Altair Inspire. Následně bude vytisknut na 3D tiskárně metodou SLS z práškového plastu polyamid PA22, který bude později detailně popsán.



Obrázek 32 - Prvotní návrh před topologickou optimalizací

### Očekávaný předpoklad a stanovení hmotnosti celé sestavy dronu

Předpoklad je stanoven na váhu 1,360 kg – předběžně. Váha rámu je zde brána dočasně jako teoretický odhad.

Tabulka 2 - Předpokládaná celková hmotnost drona

Název	[g]
Řídící jednotka	8,5
Elektromotory	126
ESC regulátory	20,8
Akumulátor	600
Vrtule	18,72
Přijímač	4,5
Rám – předběžně	<b>400</b>
Kabeláž	180
Celková hmot. dronu	1358,52

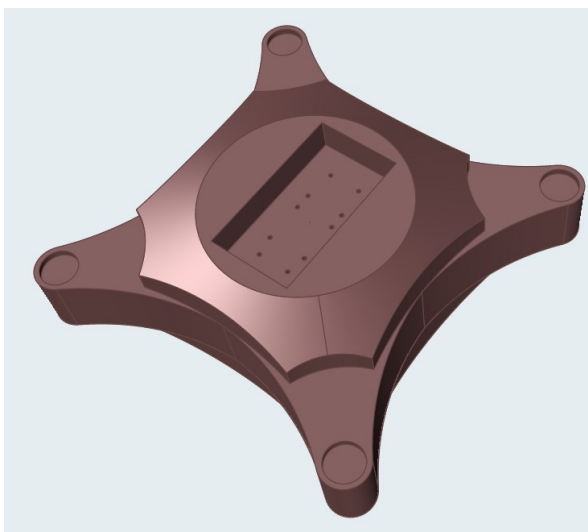
Průměrné váhy komerčních dronů podobné velikosti bývají od 1000 g do 1400 g. Aby měla optimalizace smysl, měl by být dron lehčí o 20–30 %.

## 4.2. Stanovení zátěžových stavů a návrh samotné konstrukce

V topologické optimalizaci jde o nalezení optimálního využití materiálu v určitém prostředí se zachováním vysoké tuhosti součástí. Proto jsou vytvářeny lehké konstrukce s menším množstvím objemu použitého materiálu. Následně popíšu, jak probíhala celá topologická optimalizace po krocích.

Optimalizace probíhala ve dvou programech, a to v Autodesk Inventor 2020 a Altair Inspire 2019.3.3. Jako první krok se určil základní tvar dronu, tedy tvar X a jeho základní rozměry desky, což

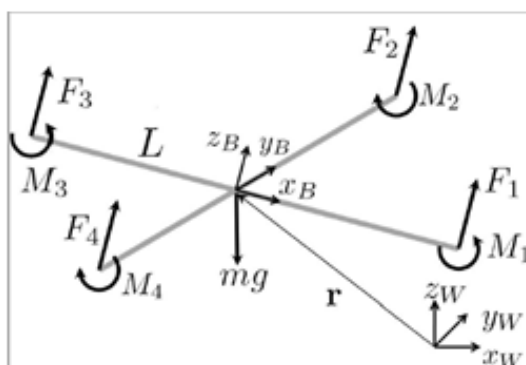
bylo 250x250mm. Tého konstrukci se říká Design Area – nejedná se o příliš propracovanou konstrukci, jedná se o tzv. předběžný návrh konstrukce.



Obrázek 33 - Design Area

Jako další krok jsem určil zátěžové stavy dronu. Nejprve uvedu, jak jsem došel k zátěžovým stavům:

Na každý dron působí určité síly a momenty, které následně rozeberu, a jsou uvedeny na obrázku číslo 34.



Obrázek 34 - Síly a momenty, které působí na dron [17]

Každá rotující vrtule vytváří dva druhy sil. Když se rotor otáčí, jeho vrtule vytváří vzestupný tah daný  $F_i = K_f \cdot \omega^2$  (znázorněný silami  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  a  $F_4$  na obrázku 2), kde  $\omega$  (omega) je rychlost rotace rotoru měřená v radián / s. Konstanta  $K_f$  závisí na mnoha faktorech, jako je konstanta proporcionality točivého momentu, zpětná EMF, hustota okolního vzduchu, plocha zametaná vrtulí atd. [17]

První, z čeho jsem vycházel, je parametr uváděný u motoru 2500kv, a to je počet otáček na 1 V napájecího napětí. Tzn. je potřeba napřed provést přepočít na čisté otáčky. Je třeba uvést maximální napětí na dronu, které je 16 V. Z toho vychází vztah číslo 5.

$$kV \cdot U_n = f = 2500 \cdot 16 = 40000 \text{ ot./min} \quad (5)$$

kde  $kV$  je počet otáček na volt [ $ot/min \cdot V$ ]  
 $U_n$  je napětí dronu [V]

Následně převedu  $ot./sec$  a pak na  $rad/s$ , abych dostal úhlovou rychlost (viz vztah číslo 6 a 7).

$$40000 \text{ } ot./min = \frac{40000}{60} \text{ } ot./sec = n \quad (6)$$

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 40000}{60} = 4188,79 \text{ } rad/s = \omega \quad (7)$$

kde  $n$  jsou otáčky [ $ot./sec$ ]  
 $\omega$  je úhlová rychlost [ $rad/s$ ]

Výrobce elektromotorů vždy udává tah motoru, tzn. dá se tedy dopočítat koeficient  $K_f$ , viz vztah číslo 8.

$$\frac{F_i}{\omega_i^2} = K_f = \frac{1700}{4188,79^2} = 9,6 \times 10^{-5} [-] \quad (8)$$

kde  $F_i$  je tah jednoho motoru [g]  
 $\omega$  je úhlová rychlost [ $rad/s$ ]

Celkový vzestup směrem nahoru generovaný všemi 4 vrtulemi, je dán součtem všech vygenerovaných jednotlivých tahů, pro  $i = 1$  až 4 je daný, viz vztah číslo 9.

$$F_{tc} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 1700 + 1700 + 1700 + 1700 = 6800 \text{ } g \quad (9)$$

Tzn. že celkový tah všech čtyř motorů je 6800 gramů. Z toho plyne, že na každé rameno působí 1700 gramů. Jako další krok je potřeba tuto veličinu převést na Newtony v základních jednotkách, viz vztah číslo 10.

$$F_t = F_i \cdot g = 1,7 \cdot 10 = 17 \text{ } N \quad (10)$$

kde  $g$  je gravitační zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

Zde se uplatňuje ještě jeden pojem, a to TWR, což v českém překladu znamená tah ku hmotnosti dronu, který musí být v určitém poměru, aby mohla kvadrokoptéra vůbec vzlétnout. Jedná se o bezrozměrnou veličinu. Má volba spočívá v tom, že jsem si stanovil  $\frac{3}{4}$ . Tzn. že když dám plyn na  $\frac{3}{4}$ , kvadrokoptéra vzlétne.

Obecně platí že jde o poměr tahu ku hmotnosti, dá se pak vyjádřit vztahem číslo 11.

Zde předpoklad váhy dronu je 1,360 kg, viz tabulka 2.

$$\frac{F_{tc}}{m} = TWR = \frac{6800}{1360} = 5 [-] \quad (11)$$

kde  $F_{tc}$  je celkový tah motorů [g]  
 $m$  je hmotnost sestavy [g]

Dron v pořádku vzlétne, jelikož tah je pětikrát větší než jeho samotná hmotnost.

Kromě vzestupné síly generují rotující vrtule také protiběžné rotační točení zvané moment (viz momenty  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  a  $M_4$  na obrázku č.34). Například rotace rotoru ve směru CW vytvoří točivý moment, který způsobí, že se tělo dronu točí ve směru CCW. Momenty  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  a  $M_4$  jsou momenty generované jednotlivými motory. Celkový moment generovaný kolem osy z dronu ( $Z_b$  na obrázku 16) je dán součtem všech 4 momentů. Je třeba brát zřetel na to, že momenty CW a CCW budou mít opačná znaménka. Tzn. že podmínka pro druhý zátěžový stav je dána vztahem číslo 12 [17]

$$\sum M_i = 0 \quad (12)$$

Opět budou mít CW a CCW momenty opačná znaménka, a tedy v ideálním stavu (nebo kdykoli nechceme žádný pohyb bočení (rotace kolem osy z)). Moment z bude blízko 0.

Naopak na  $M_z$ , celkový moment generovaný kolem výpočtů os x a y se trochu liší. Při pohledu na obrázek 15 vidíme, že motor 1 a 3 leží na ose x dronu. Takže nepřispějí k žádnému krouticímu momentu kolem osy x. Vidíme však, že rozdíl v silách vyvolaných motorem 2 a 4 způsobí, že se tělo dronu nakloní kolem své osy x, a to je celkový moment kolem osy x, který je dán vztahem číslo 13.

$$M_x = (F_2 - F_4) \cdot L = (1700 - 1700) \cdot 125 = 0 \text{ N.mm} \quad (13)$$

kde  $F_2$  a  $F_4$  jsou síly působící kolem osy x [N]

Stejnou logikou tak spočítám y, který je dán vztahem číslo 14.

$$M_y = (F_3 - F_1) \cdot L = (1700 - 1700) \cdot 125 = 0 \text{ N.mm} \quad (14)$$

kde  $F_1$  a  $F_3$  jsou síly působící kolem osy y [N]

Pro zjednodušení problematiky zavedením druhého zátěžového stavu je využit vztah číslo 12 a následné rozpočítání jednotlivých momentů (viz vztah 15 a 16), které se zavedly do zátěžového stavu dva v Altair Inspiru,

$$\sum M_i = 0 = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 212500 + (-212500) + 212500 + (-212500) = 0 \quad (12)$$

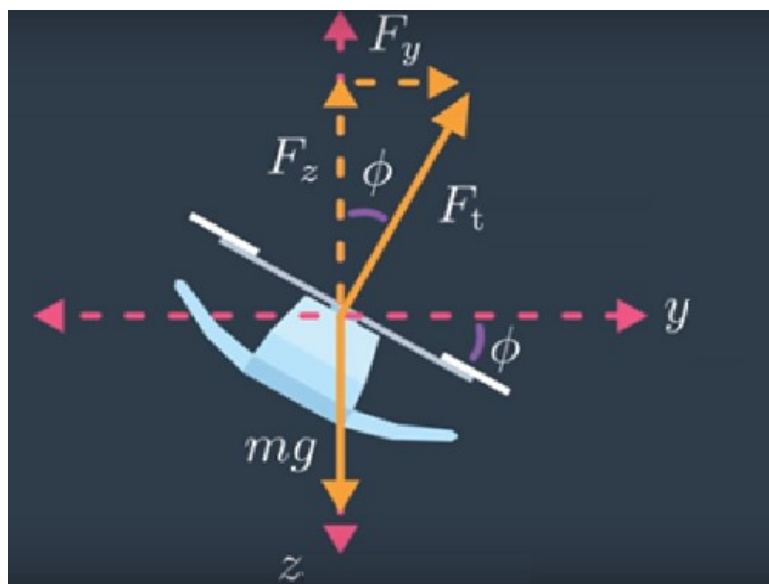
$$M_1 = F_1 \cdot L = 1700 \cdot 125 = 212500 \text{ N.mm} \quad (15)$$

kde  $L$  je vzdálenost od osy rotace rotoru ke středu kvadrotoru [mm]

$$M_2 = F_2 \cdot L = -1700 \cdot 125 = -212500 \text{ N.mm} \quad (16)$$

Moment tři je stejný jako moment jedna, protože má stejný směr točení, kdežto moment čtyři má opačný směr točení, tak je záporný stejně jako moment dva. Tzn. že v programu Altair Inspiru jsem vložil do každého ramene moment o velikosti 212500 N.mm s tím, aby byla dodržena podmínka hybnosti. Třetí zátěžový stav byl odvozen ze stavu, kdy je dron v letu. Doposud se počítalo s tím, že dron je na místě, ale teď je v letu, zde působí boční síly na dron.

Jedná se o pohyb ve směru z a x & y:



Obrázek 35 - Pohyb ve směru z a x & y [17]

Kdykoli je dron nehybný, je v souladu se světovým rámcem, což znamená, že jeho osa Z je ve stejném směru jako světové gravitační pole. V takovém případě, pokud se chce dron pohybovat vzhůru, potřebuje pouze nastavit správnou rychlost otáčení vrtule a může se začít pohybovat ve směru z podle rovnice celkové generované síly – gravitace. Pokud se však chce pohybovat ve směru x nebo y, musí se nejprve orientovat (vytvoření požadovaného úhlu theta nebo phi).

Když k tomu dojde, celkový tah generovaný čtyřmi vrtulemi ( $F_t$ ) má složky síly ve směru z a ve směru x / y, jak je znázorněno na obrázku 35. Pro výše uvedený příklad uvedu pomocí základní trigonometrie směrovou sílu z a y podle následujících vztahů 17 a 18, kde phi je úhel naklonění dronu, který jsem stanovil  $45^\circ$ .

$$F_y = F_t \cdot \sin(\phi) = 1700 \cdot \sin(45^\circ) = 1202,08 \text{ N} \quad (17)$$

kde  $F_t$  je tah motorů [g]

$$F_z = F_t \cdot \cos(\phi) = 1700 \cdot \cos(45^\circ) = 1202,08 \text{ N} \quad (18)$$

Kontrola správnosti výpočtů je pak dána vztahem číslo 19.

$$F_t = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} = \sqrt{1202,08^2 + 1202,08^2} = 1699,99 \text{ N} \quad (19)$$

Při zadávání třetího zátěžového stavu do Altair Inspire jsem však nezaváděl tyto složky síly  $F_y$  ani  $F_z$  a zadával jsem zde výslednou sílu, což je v mém případě  $F_t$ , která se rovná 17 N, a zadal jsem úhel, o který se maximálně nakloní dron, což je úhel  $\phi$ , který je v mém případě  $45^\circ$ .

Po zavedení těchto tří zátěžových stavů může dojít k samotné optimalizaci.

### 4.3. Průběh optimalizace

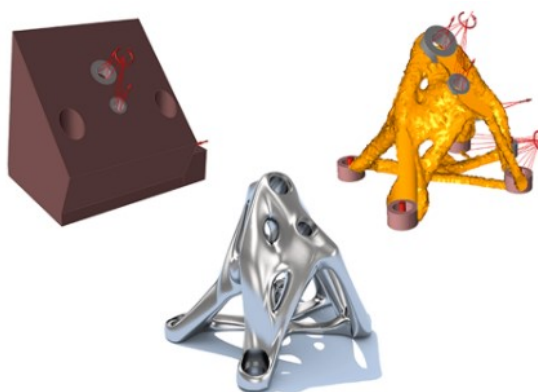
Cílem optimalizace je, aby celá konstrukce dronu byla lehčí o 20–30% než běžné komerční drony, které jsou nabízeny v obchodech.

Altair Inspire, který byl použit na počátku životního cyklu vývoje produktů, zrychluje spolupráci s vývojem, optimalizací a studiem inovativních konstrukčně efektivních součástí a sestav.

Jde o inženýrský program firmy Altair Engineering využívající technologie Opti Struct pro modelování a následné analyzování vytvořené koncepce. Altair používá CAD nástroje, které pomohou vytvářet konstrukční díly hned napoprvé.

Inspire nabízí řadu optimalizačních řešení, například.

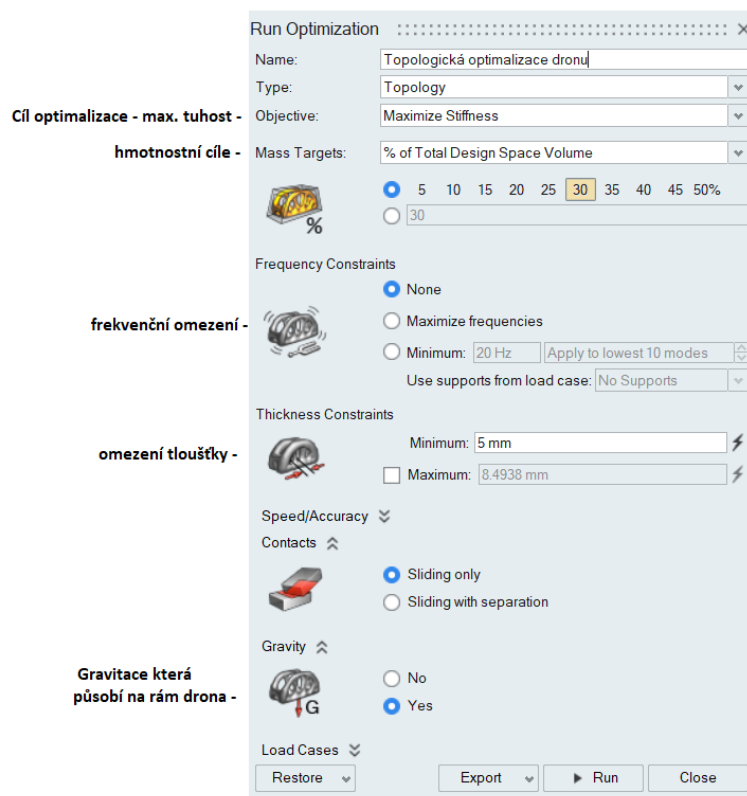
- **Optimalizační cíle:** zde se dá rozhodnout, jestli chceme docílit maximální tuhosti nebo minimalizovat hmotnost modelu.
- **Zátěžové vazby:** globální napětí vazeb mohou být použity k omezení maximálního napětí v modelu během optimalizace.
- **Akcelerační zatížení:** úhlová rychlost a nástroje pro zrychlení umožňují uživatelům definovat rychlost otáčení celého modelu a osy, kolem které se otáčí.
- **Spojovací nástroj:** nástroj, který u přilehlých součástí určí, jakým nejlepším způsobem mohou být spojeny šrouby, kolíky a ostatní komponenty.
- **Dynamická simulace pohybu:** včetně vytěžení zátěže, pomocí spolehlivé analýzy systémů s více těly systému Altair Motion Solve.



Obrázek 36 - Ukázka topologické optimalizace v programu Altair Inspire

Samotná optimalizace probíhala v SW Altair Inspire, který využívá zmíněných zátěžových stavů. Každý zátěžový stav se musí zadávat odděleně, protože optimalizace nezvládne víc jak jeden zátěžový stav. Po zavedení prvního zátěžového stavu je potřeba ukotvit dron tam, kde je nejtužší. Tzn. že podpora je umístěna ve středu dronu. Následně souřadný systém byl upraven tak, aby počátek byl umístěn také ve středu dronu. Všechny síly a momenty, které působí na dron, jsou umístěny v místě, kde jsou motory. Další zátěžové stavy byly provedeny stejným způsobem jen s jejich konkrétními hodnotami. Po zavedení zátěžových stavů je znázorněna konfigurace samotné optimalizace, která je vyobrazena na obrázku číslo 37, následný komentář je pak pod ním.





Obrázek 37 - Parametry určující optimalizaci

**Cíl optimalizace** – Zde máme na výběr z maximální tuhosti součásti a minimalizování hmotnosti. Jako cíl byl vybrán maximální tuhost součásti.

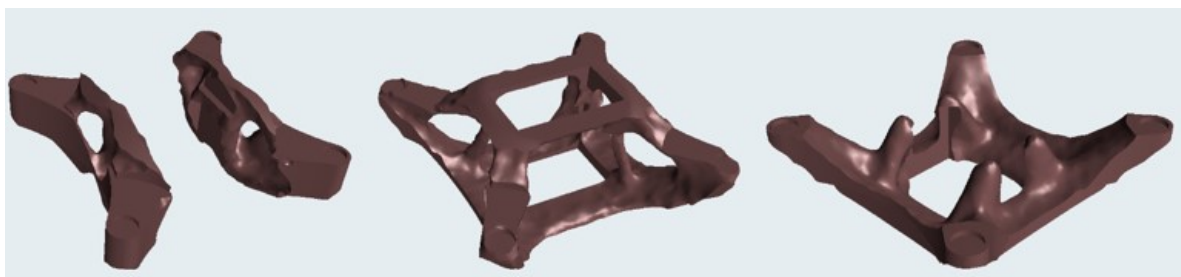
**Hmotnostní cíle** – Parametr k určení množství zadržené hmotnosti, tento nástroj může být deaktivovaný, nebo definován jako procentuální podíl z celkového objemu prostoru celkové hmotnosti, nebo hmotnosti navrženého prostoru. Použijeme procentuální podíl, jelikož budeme moci prozkoumat výsledek optimalizace pro více hodnot podílu a sami určit, který nám nejvíce vyhovuje. Já jsem určil 30 %.

**Frekvenční omezení** – To uživateli umožňuje vyřešit problémy s vibracemi. Volba je nabízena buď k maximalizaci frekvencí, nebo k nastavení minimální frekvenční hodnoty. Zde žádné frekvenční omezení nebudou zadávány, proto jsem tuhle funkci úplně vypnul.

**Omezení tloušťky** – Používá se ke kontrole minimální a maximální velikosti členů v návrhu geometrie, pokud to vyžaduje výrobní proces. Maximální velikost musí být minimálně dvojnásobkem minimální velikosti.

**Aplikace gravitace** – Tato funkce je v mém případě zapnuta, protože dron bude létat na zemi která podléhá gravitaci.

Po zadání těchto podmínek pro optimalizaci došlo k topologické optimalizaci každého zátěžového stavu, kde došlo k ubrání materiálu na nepotřebných místech, které program určil výpočtem.



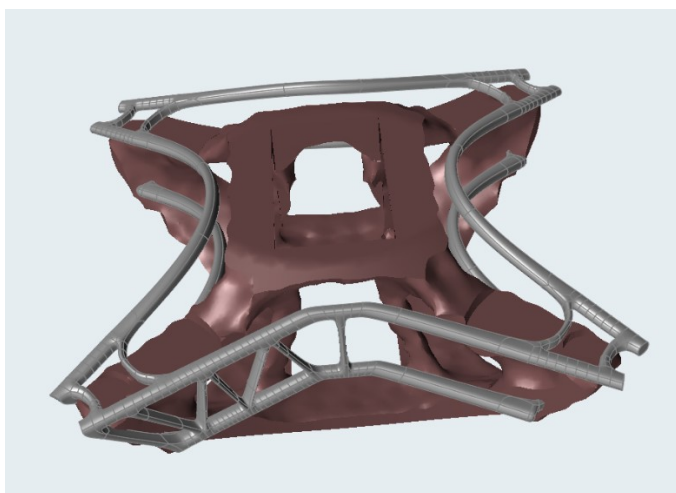
Obrázek 18 - Výsledky samotné optimalizace design arey.

Jak je zřejmé, zátěžový stav číslo dvě je pro můj návrh samotné konstrukce nejvhodnější (obrázek uprostřed). Z důvodu jak estetického, tak i silového působení v konstrukci. Proto jsem jej zvolil jako vodítko k samotnému modelování. Váha tohoto návrhu je 750 gramů. Tzn. tento návrh je nedostatečný pro mé podmínky, a proto je třeba tuto konstrukci odlehčit na co nejmenší váhu, aby vyhovovala stanoveným kritériím. Poté jsem tedy postupoval podle tohoto návrhu, avšak vlastní cestou modelování. Modelování spočívá ve vytvoření základních geometrických obrazců, které lze různě naklánět, posouvat, přesouvat, srovnávat s rovinami nebo je také odebírat, aby poté program mohl vypočítat přes složitý algoritmus tyto základní obrazce a mohl tak vyvodit výsledek. Základní obrazce z toho důvodu, že se využívá ke konečnému výpočtu, metoda konečných prvků.

Samotné modelování v Altair Inspire využívá základních funkcí PolyNurbs:



Nejčastěji využívané funkce bridge, česky jako přemostění. Sharpen je dokončení ploch, split – rozdělení. A wrap, kterým se postupně vyplňuje navržená design area. Prvky, které nejsou v PolyNurbs a často jsem je použil, jsou zaoblení a zrcadlení.

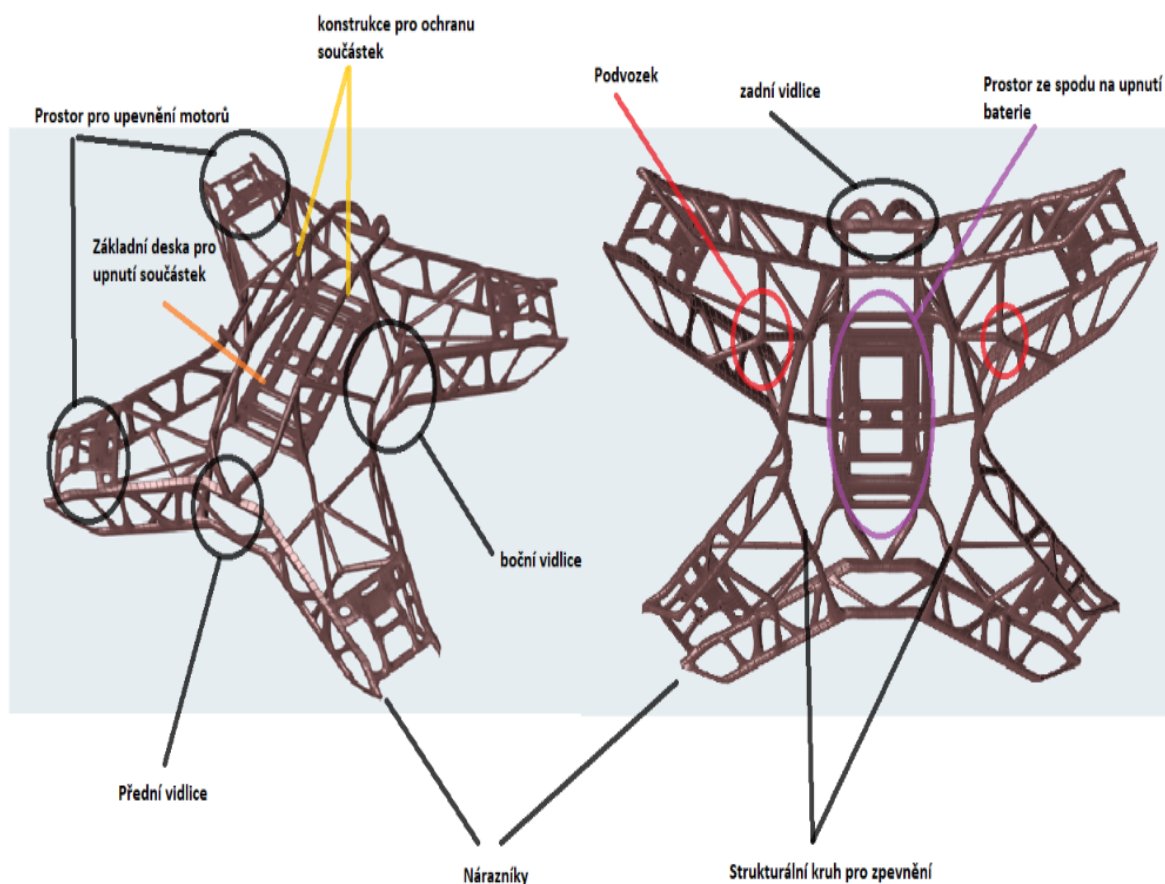


Obrázek 39 - Tvorba konstrukce

Na obrázku číslo 39 je znázorněno, jak postupně probíhal návrh konstrukce rámu. Postupná tvorba příhradoviny, tvorba podvozku, vytvoření boční vidlice, vytvoření přední a zadní vidlice.

Následně vytvoření ochrany motorů, tzv. nárazníky. Pro zpevnění celé konstrukce jsem vytvořil ze spodu strukturální prsten.

Jakmile jsem provedl návrh konstrukce, potřeboval jsem nějakým způsobem vložit oka pro šrouby kvůli uchycení. Jednalo se vlastně o sadu válečků resp. „trubiček“, kde vnitřní průměr je díra pro šroub, a vnější průměr na to, aby se opřela hlava šroubu. Vymodeloval jsem tato oka v Inventoru a naimportoval je do Inspiru tak, aby navzájem kolidovaly s konstrukcí. Následně jsem zaobličil přechodové plochy, aby vše bylo uhlazené, aby všude byly plynulé přechody a nevznikaly tak napěťové špičky.

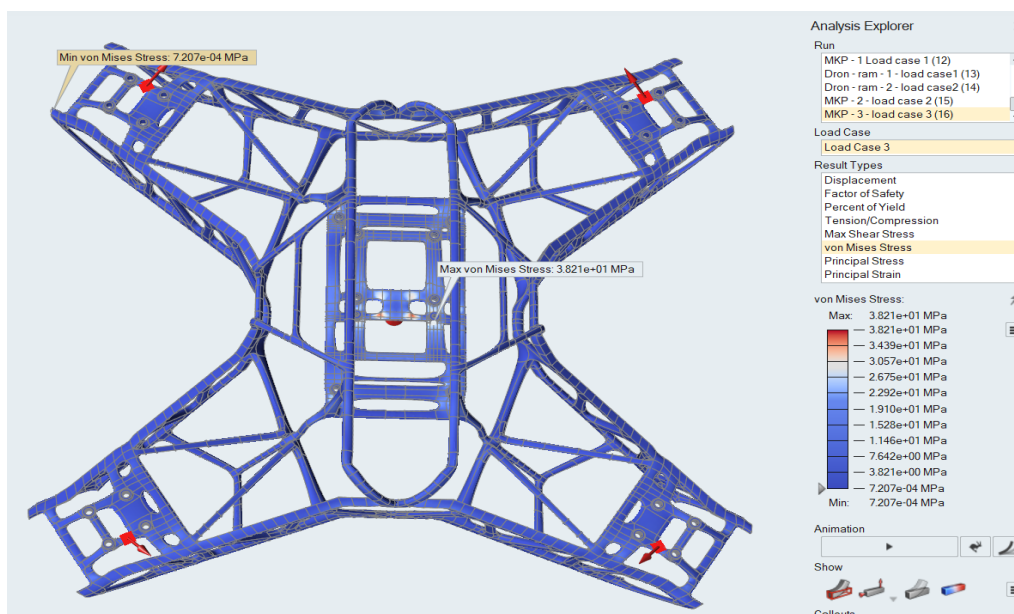


Obrázek 20 - výsledek modelování před MKP

Jakmile jsem dokončil první návrh samotné konstrukce tak tento návrh musí projít pevnostní analýzou metodou konečných prvků. Z výsledků mě nejvíce zajímalo von mises stress, což je vnitřní napětí v konstrukci a displacement, což je posunutí při daném zatížení.

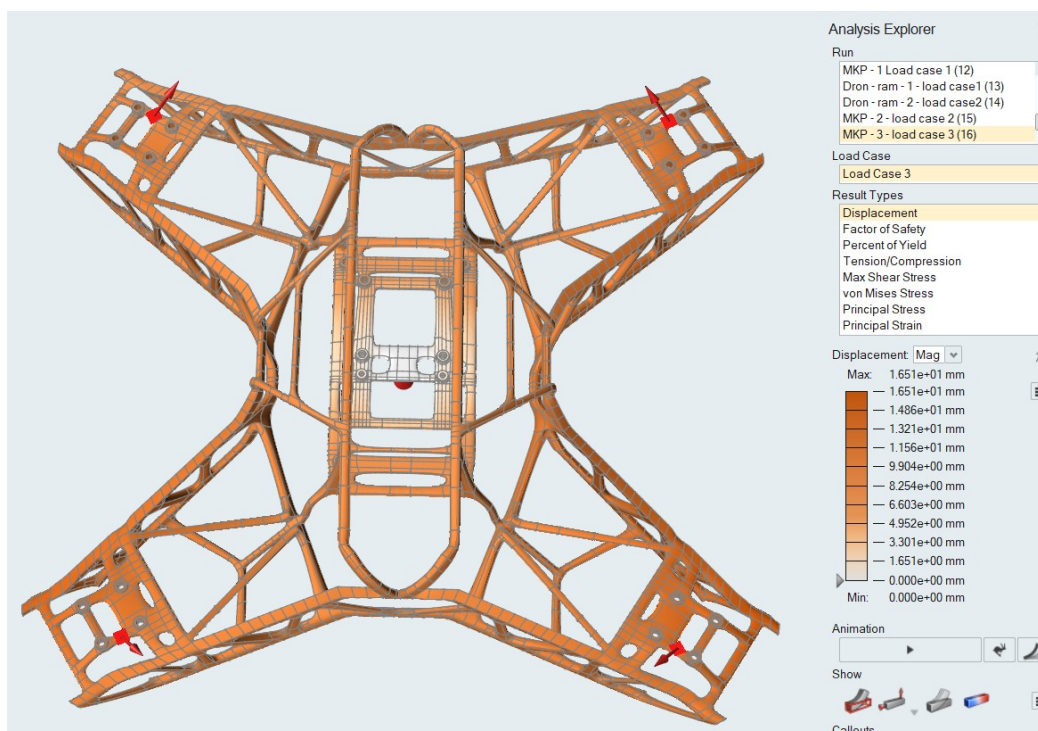
Nejpodstatnější věc, která mě nejvíce zajímala je mez pevnosti, která je u mého materiálu PA22, 48Mpa tzn. konstrukce se musela postupně zesilovat v kritických místech, a naopak v bezpečných úsecích zase naopak zeslabit. Postupně jsem hledal nejvíce optimální využití místa tak, abych se zbavil kritických míst, protože to je hlavní smysl optimalizace.

#### 4.4. Výsledky analýzy konečných prvků



Obrázek 41 - Výsledek analýzy konečných prvků – vnitřní pnutí

Na obrázku 41 je možné vidět výsledek konečných prvků pomocí zátěžového stavu číslo tři. Je to stav, kdy je dron v pohybu. Jak můžeme vidět z obrázku 41, je výsledek vnitřního napětí 38,21MPa, což podmínku tuhosti splňuje. Avšak v ostatních zátěžových stavech byly malé špičky, které přesahovaly mez pevnosti, ale v tomhle případě je to zanedbatelné, pokud se jedná jen o malé plochy (špičky).



Obrázek 42 - Výsledek celkového posunutí

Na obrázku 42 je vidět, že celkové posunutí při maximálním zatížení je 1,6 mm, což v této konstrukci s přehledem vyhovuje.

Původní odhad hmotnosti byl 400 gramů, postupnou optimalizací jsem se dokázal dostat na 60 gramů. Tzn. předpoklad, že váha klesne o 20–30 procent, je splněn a může se pokračovat ve stavbě dronu.

#### 4.5 Průběh tisku a stavby dronu

Rám dronu je vytisknut z práškového polyamidu metodou selektivního spékání laserem. Proces 3D tisku plastů s využitím metody SLS má oproti jiným metodám (např. FDM) výhodu ve vynikající homogenitě výtisků a výborných mechanických vlastnostech ve srovnání s většinou konkurenčních metod tisku plastů. Hodí se proto na výrobu funkčních dílů. Funkční celky nebo jednotlivé součástky vytisknuté metodou SLS z polyamidových prášků se s oblibou využívají v automobilovém průmyslu. [33]

Technické specifikace produkční 3D tiskárny EOS P396, kde byl rám vytisknut, jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 3 - Technická specifikace [33]

maximální rozměry tisknutelné součásti (X x Y x Z)	340 x 340 x 620	mm
rychlost výroby (do výšky)	22	mm/hod
rychlost snímání	až 2000	mm/s
rychlost polohování	3000	mm/s
tloušťka vrstvy	60-120	μm
výkon laseru	80	W



Obrázek 43 - 3D tiskárna EOS P396 [33]

Materiál PA22 a jeho vlastnosti, které jsem zadal do Altair Inspire ještě před metodou konečných prvků, jsou uvedeny v tabulce číslo 4.

Tabulka 4 - Základní vlastnosti materiálu PA12 [34]

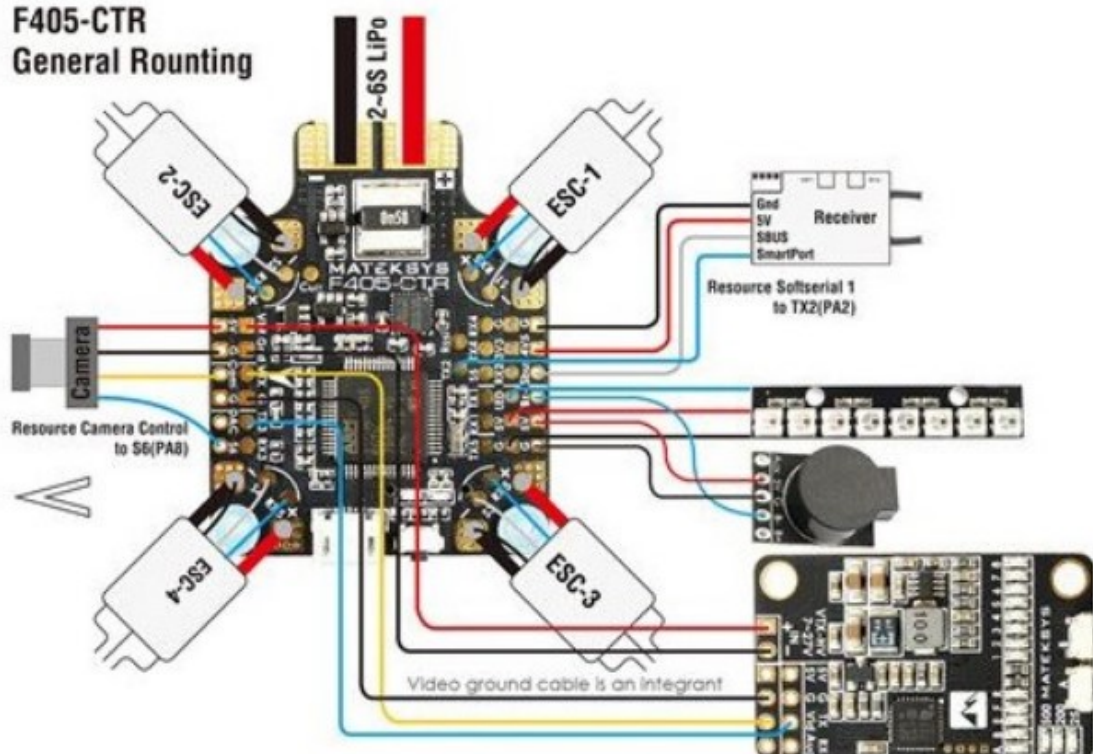
Mechanické vlastnosti	Materiál PA12	
Modul pružnosti v tahu	1650	Mpa
Mez pevnosti	48	MPa
Prodloužení při přetržení	18	%
Tepelné vlastnosti		
Teplota tání (20 ° C / min)	176	° C
Tepelná výchylka (1,80 MPa)	70	° C
Teplota vychýlení tepla (0,65 MPa)	154	° C
Hustota	930	kg / m3

#### 4.5.1 Upevnění motorů a následné připojení ESC regulátorů a baterie

Prvním krokem stavby je připevňování motorů k ramenům šrouby o délce 9 mm (o 2-3mm větší než je deska). Špatná délka vede ke stržení závitů anebo dokonce ke zničení motoru, jestliže je příliš dlouhý. Dalším krokem bylo upevnění drátů od motorů k rámu dronu, skrz to aby nepřekážely. (textilní páska, stahovací pásek). Poté se mohou ke každému motoru připojit ESC regulátory a také připevnit k rámu. Dráty by měly mít určitou vůli, aby nedošlo za chodu k jejich poškození. V další fázi se umístila na střed dronu řídicí deska jako nejdůležitější prvek celého dronu. K montáži desky byly použity stejné šrouby jako u motorů, na které se přišroubovaly plastové matky. Na matky byla následně položena deska a nakonec byla zašroubovaná M3 Soft Montem. Jsou to gumové distanční sloupky, které pomáhají odfiltrovat vibrace z motorů a je vhodné je používat. Jako další fáze bylo samotné zapojení desky s motory a ESC regulátory. Spojování proběhlo metodou pájení, kde muselo dojít u každé části na desce k oboustrannému pocínování. Ještě před samotným pájením došlo k přesnému zkrácení kabelů. Jakmile se zapájely všechny kabely, došlo k připojení přijímače k základové desce, který je umístěn hned vedle řídicí desky, následně byl také spájen. Celé zapojení je zobrazeno na obrázku číslo 44.



### F405-CTR General Rounting



Obrázek 44 - zapojení součástek k řídicí desce [35]

Následujícím důležitým krokem bylo připájení kondenzátoru k samotné desce. Další část, která se musela připevnit ke konstrukci rámu, byla baterie, která celý dron pohání. Její uložení je ze spodní strany rámu a přichycena je k němu pomocí stahovacích pásek. Poté došlo k samotnému připájení.

#### 4.5.2. Konfigurace firmware Betaflight

Poslední fáze, kterou prošel dron je konfigurace letu přes program Betaflight. Konfigurace proběhla podle daného plánu, který sdílí na jejich stránce. Zkráceně řečeno došlo k propojení základní desky s počítačem přes USB rozhraní a nahrály se tam režimy letu, aby fungovaly páčky na vysílači tak jak mají.

#### 4.5.3. Konstrukce se součástkami

Po úspěšném nahrání jsem „doladil“ vyčnívající dráty k rámu a stavba byla dokončena.

## 5. Technické zhodnocení

Zde uvedu, čeho jsem dosáhnul v praktické části. Původní návrh byl, aby hmotnost dronu byla o 20–30% lehčí, než komerční drony. Všechny technické parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 5 - Technické parametry

<b>rám</b>	<b>Kvadroptéra</b>		<b>Rozměry</b>	
<b>baterie</b>	<b>Li-Pol</b>		<b>Šířka</b>	<b>260 mm</b>
<b>ovladač</b>	<b>FlySky</b>		<b>Délka</b>	<b>280 mm</b>
			<b>Hloubka</b>	<b>75 mm</b>
<b>max. rychlost dronu</b>	<b>90 km/h</b>		<b>Material</b>	<b>PA22</b>
<b>oček. hmot. rámu</b>	<b>400 g</b>		<b>očekávané prohnutí</b>	<b>10 mm</b>
<b>výsledná hmot. rámu</b>	<b>60 g</b>		<b>výsledné prohnutí</b>	<b>5 mm</b>
<b>mez pevnosti</b>	<b>48 Mpa</b>		<b>nosnost dronu</b>	<b>6,8 kg</b>
<b>napětí v konstrukci</b>	<b>38,21 Mpa</b>		<b>max. doba letu</b>	<b>6 min</b>
<b>velikost vrtule</b>	<b>6"</b>		<b>očekávaná hmot. sest.</b>	<b>1,360 kg</b>
<b>Firmware</b>	<b>Betaflight</b>		<b>výsledná hmot. sestavy</b>	<b>909 g</b>
<b>řídící jednotka</b>	<b>Matek F405 CTR</b>		<b>výsledná cena sestavy</b>	<b>5000,- Kč</b>

Jak je zřejmé z tabulky číslo 5, je hmotnost rámu lehčí o 85 %. Očekávané prohnutí bylo 10 mm, já jsem se dostal celkově na 5 mm, čím nižší je prohnutí, tím je rám tužší a pro konstrukci dronu vhodnější. Co se týče pevnosti konstrukce tu nám určuje mez pevnosti materiálu a jaké je napětí v konstrukci. Platí pravidlo, že napětí v konstrukci musí být menší než mez kluzu materiálu.

Podmínka pevnosti je dána vztahem číslo 20, kde výsledky jsou Mpa

$$R_p \geq U_k \quad (20)$$

$$48 \geq 38,21 \quad (20)$$

kde  $R_p$  je mez pevnosti materiálu [MPa]

$U_k$  je napětí v konstrukci [MPa]

Podmínka je tedy splněna.

Nosnost dronu se odvíjí od kapacity motorů, kolik unese jeden motor krát v mém případě, jelikož mám kvadroptéru tak krát čtyři. Jedná se o tahovou sílu, která je vynásobena číslem čtyři a je vyjádřena vztahem číslo 21.

$$N_c = 4 \cdot F_t = 4 \cdot 1700 = 6800 \text{ g} \quad (21)$$



Doba letu  $t_d$  nejde stanovit úplně přesně z toho důvodu, že nezáleží jen na typu zvolené baterie, ale také na rychlosti a způsobu letu, zatížení či v daných povětrnostních podmínkách. Výrobce však udává, kolik baterie vydrží při daném odběru při určitém napětí. V mém případě při standartním létání baterie vydrží okolo 6 minut.

Lze použít obecný výpočet pro dobu letu dronu viz vzorec číslo 22.

$$t_D = \frac{K}{I} = \frac{6}{60} = \frac{1}{10} \text{ hod.} = 6 \text{ minut} \quad (22)$$

kde  $K$  je kapacita baterie [Ah]  
 $I$  je proud odebíraný při optimálním odběru motorů [A]

Co se týče systému, který je použit pro nastavení řídicí desky, jde o Betaflight. Tento systém je nejpoužívanější a uživatelsky přívětivý. Celým smyslem této práce bylo, aby proběhla optimalizace hlavně hmotnosti s určitou tuhostí. Prvotní návrh byl 1,360 kg. S pomocí optimalizačního programu Altair Inspiru jsem se dostal na celkovou váhu sestavy na 909 gramů, což splňuje původní podmínku, kdy musí dojít k optimalizačnímu poklesu hmotnosti aspoň o 25 %. V mém případě jsem dokázal snížit hodnotu o 451 gramů, což je v procentech 33,16 %. Původní požadavky jsou tedy splněny.

## 6. Závěr

V dnešní době se problematika dronů a jejich stavba dostává do popředí, a proto se rozrůstá. Kombinace strojního inženýrství s 3D tiskem tvoří obor, ve kterém strojař dokáže navrhnout futuristickou konstrukci a následně ji snadno vyrobit s minimálním odpadem, což si troufnu říct, že je budoucností a odpadnou tím tak klasické konvenční metody v obrábění. S přibývajícím počtem dronů stoupá také důraz na bezpečnost a ochranu lidí. Stát proto neustále vydává zákony, které zdůrazňují pádnost na tuto oblast. Poslední, který je aktualizovaný, je k datu 26.12.2019 dodatek X. Avšak můj dron to nijak neovlivňuje, protože patří do kategorie nejlehčích dronů.

V průběhu hledání podkladů pro tuto práci jsem se dozvěděl plno nových věcí ze světa dronů, ať už se to týká optimalizace, legislativy anebo 3D tisku. Mně to dodalo do práce elán a tak jsem ji dělal celou s nadšením. Tato práce obsahuje všechny typy dronů a jejich komponenty, které jsou potřeba k celé sestavě, aby fungovala. Dále je rozebraná problematika topologické optimalizace a její typy, které se používají. Potom jsem rozebral, co to vlastně bionika vůbec je a jakým hlediskem přispívá do strojního inženýrství. Jak se postupem času začala příroda zakomponovávat do strojírenství a přispěla tak krásnou estetikou do chladné strojařiny. Na to jsem uvedl zajímavé architektonické stavby spjaté například s anatomii těla člověka či zvířat.

Na konci teoretické části je pak uveden princip letu dronu a je zde graficky znázorněno, jaké stavy mohou nastat při jeho letu, aby došlo k pochopení celé problematiky udržení dronu ve vzduchu. Následně jsem uvedl očekávané předpoklady pro splnění této diplomové práce. Praktická část obsahuje samotný konstrukční návrh celého dronu, který probíhal v Altair Inspire a Autodesk Inventor. Zde je popsán celý průběh krok po kroku jak má optimalizace probíhala, k čemu jsem dospěl a jestli jsem vůbec splnil očekávané předpoklady. Po optimalizaci rámu a jeho výpočtech došlo k samotnému tisku na 3D tiskárně EOS P396 práškovou metodou selektivního laserového slinování. Materiál rámu byl z materiálu PA12 (polyamid, nylon). Tloušťka vrstvy byla pak nastavena na hodnotu 120  $\mu\text{m}$  s orientací v komoře naležato. Doba čistého tisku pak byla 6 hodin. Po vytisknutí došlo k sestavení celé sestavy, kde všechny součástky dodala firma Rotorama se sídlem v Praze. Stavba probíhala v několika krocích, které jsou v práci uvedeny. Stavba končila v momentě, kdy došlo k nahrání firmwaru Betaflight.

Na závěr této práce jsem technicky zhodnotil konstrukci celé stavby dronu a odůvodnil slovně i početně dosažené výsledky, kterých jsem dosáhnul. Pro přehlednost jsem všechny dosažené výsledky porovnal s počátečními předpoklady a tím jsem ukončil práci na dronu.

Předpokládám, že s rozvíjejícím se oborem dronů časem může dojít k podpoře lidí a tak přinést ulehčení prací. Vypracování této práce bylo pro mě velkou výzvou, ale hlavně velkým přínosem hned v několika oborech. Nejenže jsem se více seznámil s tímto tématem, které mě baví a začal jsem se díky tomu o něj zajímat, ale také jsem si obohatil znalosti ohledně technické stránky psaní akademických prací. Věřím, že nashromážděné informace, vzhledem k rychlému vývoji oblasti bezpilotních letadel a jejich využití zúročím během další praxe. Každopádně tuto oblast zájmu osobně pokládám za důležitou pro rozvoj lidstva v tomto století, ve kterém aktuálně žijeme.

## 7. Zdroje

- [1] DUFKA, Bc. Petr. Bezpečnostní studie reálného využití bezpilotních letadel typu „Drone“. Ostrava, 2017. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Stanislav Lichorobiec, Ph.D.
- [2] Novák, L., Fiedler, J., Šonovský, Š., Kyjovský, D.,: Závodní koptery a jak na ně. Rotorama, Praha 2019, 166 s.
- [3] CZ Defence: Czech army and defence [online]. Praha: Defence Magazine, 2019 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.czdefence.cz/clanek/armada-ceske-republiky-od-ledna-2020-zridi-prapor-dronu-jejich-vyber-je-naplanovan-nejdrive-za-3-roky>
- [4] HAMAN, Tomáš. *PŘEHLED BEZPILOTNÍCH LETOUNŮ: SUMMARY OF UNMANNED AERIAL VEHICLE*. Brno, 2010. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. IVAN DOFEK.
- [5] ČERVENKA, Ondřej. SYSTÉM ŘÍZENÍ LETOVÝCH CHARAKTERISTIK AUTONOMNÍHO DRONU: FLIGHT CHARACTERISTIC CONTROL SYSTÉM FOR AUTONOMOUS DRONE. Brno, 2016. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Václav Šimek.
- [6] LASNOVSKÝ, Lukáš. Sociální funkce dronů a jejich využití ve veřejném prostoru. Brno: Masarykova univerzita, Filozofická fakulta, Teorie interaktivních médií, 2016. Vedoucí bakalářské práce: PhDr. Martin Flašar, Ph.D.
- [7] Jak si vybrat quadcopter s kamerou. In: Choice - Techinfus [online]. 2018 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://choice-cs.techinfus.com/vybor/1350-kak-vybrat-kvadrokopter.html>
- [8] Kabelmanie [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.kabelmanie.cz/kvadrokoptera-nine-eagles-galaxy-visitor-6-mod-2>
- [9] DRAGONFLY110 Y4 110mm Mini FPV RC Drone PNP - Colormix. In: Gearbest [online]. China [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: [https://www.gearbest.com/brushless-fpv-racer/pp\\_1527579.html](https://www.gearbest.com/brushless-fpv-racer/pp_1527579.html)
- [10] DIY S550 Hexacopter PX4 Pixhawk Flight Controller NEO-7M GPS PPM 30A ESC 2212. In: Ebay [online]. 2020, 2020 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.ebay.co.uk/itm/DIY-S550-Hexacopter-PX4-Pixhawk-Flight-Controller-NEO-7M-GPS-PPM-30A-ESC-2212-/273573358077>
- [11] SkyhawkRC F900 Octocopter frame Kit RTF Multicopter aerial photography professional rc drone hobby model aircraft VS DJI S1000. In: Aliexpress [online]. China, 2019 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://ko.aliexpress.com/item/2054389565.html>
- [12] BENDSOE, Martin Philip a Ole SIGMUND. Topology optimization: theory, methods and applications. Second edition, corrected printing. Berlin: Springer, 2004. ISBN 978-3-540-42992-0.
- [13] ZHANG, Weihong, Jihong ZHU a Tong GAO. Topology optimization in engineering structure design. London: ISTE Press, 2016. ISBN 978-1-78548-224-3.
- [14] SADRI, M. KAVANDI, M. JOZEPIRI, A. TEIMOURI, S. ABBASI, F. [online] Bionic Architecture, Forms and Constructions Research Journal of Recent Sciences.Zanjan: Islamic Azad University, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 93-98. [vid. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://www.isca.in/rjrs/archive/v3/i3/16.ISCA-RJRS-2013-322.pdf>
- [15] Leonardo Da Vinci: Létající stroj. In: Dreamstime [online]. 2019 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.dreamstime.com/stock-photos-3d-da-vinci-ornithopter-flying-machine-image21903743>
- [16] Quadcopter Physics Explained. Hackernoon [online]. 2018 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://hackernoon.com/quadcopter-physics-explained-468ee44ba40b>
- [17] Demystifying Drone Dynamics! Towards data science [online]. 2018 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/demystifying-drone-dynamics-ee98b1ba882f>

- [18] Rotorama: RCinpower GTS V2 2207 Plus 2500KV [online]. Praha: Rotorama s.ro., 2017 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.rotorاما.cz/motory/rcinpower-gts-v2-2207-plus-2500kv>
- [19] Rotorama: HGLRC Forward FD50A 50 A 32Bit 2-6S [online]. Praha: Rotorama, 2019 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.rotorاما.cz/regulatory/hglrc-forward-fd50a-blheli-32-50a-2-6s-dshot-1200-esc>
- [20] Rotorama: Gemfan Flash 5144-3 Flash [online]. Praha: Rotorama, 2019 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.rotorاما.cz/vrtule/gemfan-flash-durable-5144>
- [21] Astra: Přehledné informace o typech akumulátorů [online]. Uherský Brod: Astra, 2016 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.astramodel.cz/cz/blog/prehledne-informace-o-typech-akumulatoru.html>
- [22] Lithium polymerové akumulátory PolyQuest/SharkPOWER a jejich bezpečné používání. 2014. Dostupné také z: [http://www.rcm-pelikan.cz/dld/Shark\\_Power\\_LiPo.pdf](http://www.rcm-pelikan.cz/dld/Shark_Power_LiPo.pdf)
- [23] Rotorama: Acehe 1800mAh 4S 75C. Rotorama: Vše o dronech [online]. Praha, 2016 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.rotorاما.cz/baterie/acehe-1800mah-4s-75c>
- [24] Rotorama: Matek F405 CTR. Rotorama [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.rotorاما.com/6s/matek-f405-ctr>
- [25] MYSLIVEC, Tomáš. Omni-směrové bezpilotní letadlo. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Prof. Ing. Miloš Schlegel, CSc.
- [26] Rotorama: Flysky X6B přijímač s PPM/i-Bus [online]. Praha: Rotorama, 2019 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.rotorاما.cz/rc/flysky-x6b-prijimac-s-ppm-i-bus>
- [27] Rotorama: Flysky FS-i6X (10ch+X6B) [online]. Praha: Rotorama, 2019 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.rotorاما.cz/rc/flysky-fs-i6x-10ch-x6b>
- [28] SvetDronu: VELKÝ PRŮVODCE: Základy pro stavbu dronu. [online]. 2020 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://svetdronu.net/velky-pruvodce-zaklady-pro-stavbu-dronu/>
- [29] DroneWeb: Nová pravidla pro drony [online]. 2019 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://www.droneweb.cz/legislativa-provozu-dronu/item/333-drony-legislativa-eu>
- [30] Stepienybarno: PALACIO TUWAIQ #ProyectoDeIdía [online]. 2017 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.stepienybarno.es/blog/2017/08/18/palacio-tuwaiq-proyectodeldia/>
- [31] Miniquadtestbench: test motoru [online]. 2017 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.miniquadtestbench.com/assets/components/motordata/motorinfo.php?uid=234>
- [32] SurveilZone: RCINPOWER GTS2207 PLUS V2 1860KV 2500KV 2750KV FPV Racing Brushless Motor [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://www.surveilzone.com/RCINPOWER-GTS2207-PLUS-V2-1860KV-2550KV-2750KV-FPV-Racing-Brushless-Motor-g-2290>
- [33] Protolab: 3D tisk plastů metodou Selective Laser Sintering [online]. Ostrava [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://protolab.cz/3d-tisk-plastu>
- [34] EOS: Industrial 3D printing [online]. 2020 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/sls-polymer-materials/polyamide-pa-12-alumide>
- [35] Emotors.cz: Matek F405-CTR s PDB OSD 5V/2A [online]. 2018 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://emotors.cz/cs/root/7230-matek-f405-ctr-s-pdb-osd-5v2a.html>
- [36] Houska-modelar.cz: GENS ACE LIPO TATTU serie - 6750 mAh 14,8V 4S1P (25C) [online]. Praha 8, 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: [https://www.houska-modelar.cz/shop/product\\_info.php?cPath=1072\\_1337\\_12&products\\_id=21227&osCsid=1udh4rg8spjh24p8tl0fnrem61](https://www.houska-modelar.cz/shop/product_info.php?cPath=1072_1337_12&products_id=21227&osCsid=1udh4rg8spjh24p8tl0fnrem61)